

Д.Н.Гаркунов

ТРИБОТЕХНИКА

ИЗНОС И БЕЗЫЗНОСНОСТЬ

4-е издание,
переработанное и дополненное

Рекомендовано Министерством образования Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов», направления подготовки дипломированных специалистов «Машиностроительные технологии и оборудование»

МОСКВА
2001

Издательство МСХА

УДК 620.179.112(075.8)
ББК 34.41я Г20 73
Г20

Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина
Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина

Рецензенты: **В.В. Стрельцов, В.Ф. Пичугин**

Гаркунов Д.Н.

Г20 **Триботехника** (износ и безызносность): Учебник. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: «Издательство МСХА», 2001. 616 с., ил. 280.

ISBN 5-94327-004-3

Книга состоит из введения в триботехнику и двух частей: первая часть посвящена износу, а вторая — безызносности.

Во введении изложены практические примеры решения задач триботехники, этапы развития триботехники в России и ее инженерно-технические проблемы.

В первой части книги рассмотрены физико-химические свойства поверхностей, взаимное контактирование деталей, виды трения в узлах машин и механизм износа деталей. Подробно проанализированы виды изнашивания и различные повреждения поверхностей, включая и от циклических контактных нагрузок. Особое внимание уделено водородному изнашиванию — новому виду контактного взаимодействия твердых тел. В зависимости от вида изнашивания или повреждения поверхностей трения указаны методы повышения долговечности деталей.

Во второй части рассмотрена сущность эффекта безызносности, его механизм и закономерности. Описано как было установлено это явление. Исследуются физико-химические процессы безызносности. Показано, что эффект безызносности относится к самоорганизующимся явлениям неживой природы.

Во второй части большое место уделено применению эффекта безызносности в различных отраслях техники: авиации, морском флоте, химическом машиностроении, тяжелом машиностроении, легкой промышленности и др. Даны методы оценки антифрикционных и прочностных свойств тонких металлических покрытий и испытаний смазочных материалов. Изложен новый курс в преподавании триботехники; в нем излагаются три вопроса, которые позволяют реализовать эффект безызносности в узлах трения машин: финишная антифрикционная безабразивная обработка поверх-ностей трения стальных и чугунных деталей, металлоплакирующие смазочные материалы и безразборное восстановление изношенных двигателей внутреннего сгорания.

Для студентов по специальности 120600 «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов». Книга может быть полезна для научных и инженерно-технических работников машиностроительных и ремонт-ных предприятий.

ISBN 5-94327-004-3

Молодой научной смене
и светлой памяти моих наставников и друзей
трибологов:

Леонида Владимировича Елина	*(1909—1953),*
Абрама Ассировича Старосельского	*(1903—1972),*
Петра Александровича Ребиндера	*(1898—1972),*
Юрия Сергеевича Симакова	*(1938—1988),*
Игоря Викторовича Крагельского	*(1908—1989),*
Андрея Анатольевича Полякова	*(1916—1995),*
Евгения Алексеевича Панфилова	*(1933—1999),*

посвящается эта книга

автор

Ветки густые,
волны речные
дали какие,
думы какие?
Эхо отлета
тает в зените,
время отсчета,
время открытий...

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1967 г. издательство "Машиностроение" выпустило книгу "Долговечность трущихся деталей машин", авторы А.А. Старосельский и Д.Н. Гаркунов. Она предназначалась для конструкторов и технологов машиностроительной промышленности, инженеров, занятых ремонтом и эксплуатацией машин, а также как учебное пособие для студентов механических специальностей вузов. Книга охватывала как общие представления о повреждениях рабочих поверхностей деталей машин, так и вопросы взаимосвязи конструкторских, технологических и эксплуатационных факторов с износостойкостью деталей.

Несмотря на достаточно большой тираж, книга быстро разошлась и получила положительные отзывы от многих известных специалистов того времени и авторы предполагали ее переиздать. К сожалению, в 1972 г. А.А. Старосельский умер, и эта работа была отложена почти на 15 лет.

За эти годы многие вопросы, изложенные в книге, потребовали дополнения и пересмотра, накопились новые важные сведения в области трения, износа и смазки машин. Опыт преподавания курса "Триботехника" в институте повышения квалификации Госстандарта СССР подтвердил необходимость издания более обширной книги.

В 1985 г. издательство "Машиностроение" выпустило новую книгу под названием "Триботехника". В книге были рассмотрены основные этапы развития триботехники в СССР и ее современные проблемы. Описаны физико-химические свойства рабочих поверхностей деталей, условия их контактного взаимодействия, виды трения и механизм изнашивания. Проанализированы виды изнашивания и повреждений. Особое внимание было уделено водородному изнашиванию – новому виду контактного взаимодействия твердых тел. Рассмотрен избирательный перенос (эффект безызносности) при трении и указаны области его рационального использования в машиностроении.

Книга предназначалась для инженерно-технических работников, а также для специалистов, занятых ремонтом и эксплуатацией машин. Отмечалось, что она может быть использована в качестве учебного пособия для студентов технических специальностей вузов.

После опубликования книги "Триботехника" Методический отдел Министерства высшего и среднего специального образования СССР признал книгу "Триботехника" как учебник для вузов и предложил автору ее переиздать. К этому времени ряд вузов стал готовить студентов по специальности 1206 "Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов". В 1989 г. вышло второе издание книги "Триботехника".

К настоящему времени курс "Триботехника" стал читаться во многих вузах России. Автор получил запросы на книгу не только из российских высших учебных заведений, но и из стран СНГ, Литвы, Латвии, Польши.

По замыслу автора *учебник "Триботехника"* должен состоять из трех книг:

1. Триботехника (пособие для конструктора);
2. Триботехника (износ и безызносность);
3. Триботехника (технологические и эксплуатационные методы).

Первая книга (пособие для конструктора) издана в 1999 г. В ней рассмотрены конструктивные приемы повышения долговечности трущихся деталей машин. Даны сведения о материалах, применяемых для изготовления узлов трения машин и их сочетания в парах трения, зазорах в сочленениях, жесткости и податливости подвижных деталей, методах подвода смазочного материала к поверхности трения, оценке и выбору принципиальной схемы узлов трения с позиций ее влияния на износостойкость и надежность работы машины.

На отдельных примерах показаны наиболее удачные конструкции уплотнений, плавающих деталей, защиты деталей от загрязнений, химического воздействия среды, паразитных токов, замены подшипников скольжения на подшипники качения и др.

Данное издание — вторая книга (износ и безызносность) — состоит из введения в триботехнику, первой части, посвященной износу и второй части – безызносности. Износ и безызносность–это два противоположных явления.

В первой части книги, как и в предыдущих ее изданиях, изложены этапы развития триботехники в России, ее современные проблемы, исходящие из задач, стоящих перед машиностроением. Для понимания процессов трения и механизма изнашивания рассмотрены вопросы качества и физико-химических свойств поверхностей деталей и их контактирования, дано описание видов трения в узлах машин, освещена роль окисных пленок и твердых смазочных материалов. Рассмотрены механизм и стадии изнашивания металлов и полимеров, а также распределение суммарного износа между деталями. Приведена классификация видов разрушения рабочих поверхностей. Описаны отдельные виды повреждений, даны некоторые их закономерности и намечены меры по их уменьшению.

Систематизированы сведения об основных видах повреждений поверхностей трения: кавитации, эрозии, коррозии, фреттинг-коррозии, трещинообразования, не являющиеся в узком смысле слова видами изнашивания. Наиболее полно описано водородное изнашивание, которое установлено сравнительно недавно и еще недостаточно рассмотрено в технической литературе. Водородное изнашивание резко снижает долговечность машин, а в ряде случаев создает аварийную обстановку в ответственных подвижных узлах самолетов, автомобилей и других машин.

Ускорение износа водородом имеет место практически во всех трущихся сочленениях из-за присутствия воды в атмосфере, из-за неизбежного окисления смазок, а также почти постоянного содержания водорода в стали.

Раскрытие закономерностей водородного изнашивания открывает новые пути повышения износостойкости и надежности трущихся деталей машин (автомобилей, самолетов, дорожно-строительных машин, морского флота, машин железнодорожного транспорта и др.)

Во второй части книги, состоящей из четырех глав и заключения, излагаются вопросы безызносности машин.

При эффекте безызносности все процессы направлены на создание новых самоорганизующихся структур на поверхностях трущихся деталей. Эти новые структуры защищают поверхности от непосредственного контактирования материала деталей и их разрушения.

Естественно на практике процессы разрушения и созидания могут происходить одновременно и тогда результат может быть не предсказуем. Задача исследователей и состоит в том, чтобы исключить процессы разрушения или их свести к минимуму, а процессы созидания усилить и придать им превалирующее значение.

В первой главе изложен материал, относящийся к теоретическим и экспериментальным вопросам безызносности. Уделено внимание синергетике – науке о самоорганизующихся процессах разной природы. Именно эффект безызносности базируется на этом новом междисциплинарном направлении развития науки. Приводятся экспериментальные результаты по структуре и кинетике поверхностных пленок, образующихся на поверхностях деталей в процессе трения, по образованию в смазочном материале координационных соединений, по взаимному обмену веществом между поверхностями трения и смазкой. Сделана попытка доказать, что при эффекте безызносности в зоне контакта образуется диссипативная структура со всеми ее особенностями, что является главным отличием этого явления от обычного трения при граничной смазке.

Вторая глава содержит сведения по использованию методов повышения износостойкости трущихся деталей, основанных на эффекте безызносности в различных отраслях техники: авиационной, морского флота, химической промышленности, тяжелого машиностроения, легкой промышленности и др.

Третья глава посвящена методам испытаний антифрикционных свойств конструкционных и смазочных материалов. Показано, что при оценке смазочных материалов некоторые методы, которые используются для испытаний обычных смазочных материалов, оказываются непригодными. Машины трения с точечным или линейным контактом не способны при работе изменять физико-химические свойства смазочных материалов, создавать в них координационные соединения и обеспечивать обмен веществом поверхностей трения с внешней средой. В этих машинах не воспроизводятся те физико-химические процессы, которые происходят при эффекте безызносности.

В четвертой главе представлены материалы к новому курсу триботехники "Эффект безызносности в узлах трения", который начал читаться с 1999 г. в Российском государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина. В этом курсе главное внимание уделено трем вопросам:

— финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) стальных и чугунных деталей;

— металлоплакирующие смазочные материалы, реализующие избирательный перенос при трении;

— безразборное восстановление двигателей внутреннего сгорания.

В заключении второй части книги описан процесс признания эффекта безызносности как научного открытия, даны отзывы некоторых известных ученых по этому явлению и изложен прогноз развития исследований по триботехнике с использованием эффекта безызносности.

Автор при изложении материалов второй части книги в большой степени использовал результаты исследований своих учеников и последователей. Результаты их работ выделены в отдельные подразделы.

В настоящее время готовится публикация — третья книга — "Триботехника. Технологические и эксплуатационные методы", являющейся продолжением первых двух книг.

В первой части этой заключительной книги рассмотрены технологические методы повышения износостойкости машин и механизмов. Изложены сведения о качестве сопрягающихся поверхностей деталей и точности их взаимного расположения в связи с износостойкостью. Описаны химико-термические, термическая и химическая обработки поверхностей трущихся деталей. Подробно даны сведения о гальванических покрытиях, особенно хромовом покрытии, как наиболее эффективном и широко применяемом в качестве износостойкого покрытия. Представлены материалы о наплавке трущихся деталей, металлизации напылением, покрытии деталей дисульфидом молибдена, электроискровом упрочнении, механическом наклепывании, обработке поверхностей лучом лазера и др. Даны подробные сведения о финишной антифрикционной безабразивной обработке (ФАБО) поверхностей стальных и чугунных трущихся деталей, особенно цилиндров двигателей внутреннего сгорания; эффективности этого метода и целесообразных областей его использования.

Вторая часть книги посвящена эксплуатационным методам повышения износостойкости узлов трения машин и оборудования. В ней рассмотрены вопросы обкатки машин, стендовых и эксплуатационных испытаний, смазки узлов трения в эксплуатации, влияния условий эксплуатации и режима работы машины на износ деталей. Дан метод безразборного восстановления изношенных машин и механизмов.

ВВЕДЕНИЕ В ТРИБОТЕХНИКУ

1. Общие сведения

Трение — удивительный феномен природы! Оно подарило человечеству тепло и огонь, возможность в короткое время остановить скоростной поезд и автомобиль, ускорить химическую реакцию в сто тысяч раз, записать человеческий голос на пластинку, услышать звуки скрипки и многое другое.

Трение изучали Леонардо да Винчи и Ломоносов, Амонтон и Кулон, Петров и Эйлер, Менделеев и Рейнольдс и другие ученые. В наше время трение изучали академики Н.Е. Жуковский, Е.А. Чудаков, В.Д. Кузнецов, П.А. Ребиндер, проф. А.С. Ахматов., чл.-корр. АН СССР Б.В. Дерягин, проф. И.В. Крагельский, проф. М.М. Хрущов и др.

Сегодня в нашей стране изучением трения, изнашивания и смазки машин занимаются многие ученые, профессора, доктора наук: Б.М. Асташкевич, Э.Д. Браун, В.Н. Виноградов, Б.Т. Грязнов, Ю.Н. Дроздов, Ю.А. Евдокимов, М.Н. Ерохин, чл.-корр. РАН В.И. Колесников, А.К. Прокопенко, А.С. Проников, Г.М. Сорокин, А.В. Чичинадзе и многие другие.

За рубежом известными учеными в этой области являются: Ф. Боуден, Д. Тейбор, С. Баходур, К. Лудема, Н.П. Су, Д. Бакли, М. Амбрустер, Н. Краузе, Н.Уетц, Н.Чихос, Г. Фляйшер, Г. Польцер, Р. Марчак, С. Пытко, Ю. Подгуркас и др.

До настоящего времени трение во многих его аспектах остается загадкой. При трении (и только при трении) одновременно происходят механические, электрические, тепловые, вибрационные и химические процессы. Трение может упрочнить или разупрочнить металл, повысить или уменьшить в нем содержание углерода, насытить металл водородом или обезводородить его, превратить золото и платину в окислы, отполировать детали или сварить их. Трение является самоорганизующимся процессом, при котором с определенной последовательностью и весьма "разумно" протекают явления, направленные на разрушение поверхности или же, наоборот, на создание целой серии систем, снижающих износ и трение.

Сегодня с трением связана одна из самых острых проблем современности — износ машин и механизмов. Расходы на восстановление машин в результате износа огромны, причем ежегодно они увеличиваются. Удлинение срока службы машин и оборудования даже в небольшой степени равноценно вводу значительных новых производственных мощностей.

Одним из средств повышения производительности труда является интенсификация рабочего процесса машины, что связано с повышением ее рабочих параметров и, в частности, скоростей, и нагрузок. Неизменным требованием является снижение удельной массы машины, т.е. массы, отнесенной к единице мощности или производительности. Однако

это усиливает напряженность работы узлов и деталей и усложняет решение проблемы надежности. Введение поточных методов производства, создание автоматических линий и цехов, сложных машин и аппаратов повышают требования к длительности и безотказности работы каждого агрегата.

Надежность любого технического устройства (прибора, аппарата, инструмента, машины, агрегатов, узлов и деталей, системы машин) — это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования. Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения включает безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость. Количественной характеристикой одного или нескольких свойств, составляющих надежность изделий, являются показатели надежности.

Для характеристики безотказности используют вероятность безотказной работы, среднюю наработку до отказа, установленную безотказную наработку, интенсивность отказов и др.

Долговечность изделий характеризуют такими показателями, как средний ресурс, назначенный или установленный срок службы и др. Ремонтопригодность количественно определяют вероятностью восстановления работоспособного состояния за заданное время и средним временем восстановления работоспособного состояния. Для характеристики сохраняемости чаще всего используют средние сроки сохраняемости.

Названные выше показатели относятся к единичным показателям надежности, так как характеризуют только одно из ее свойств. Показатели, характеризующие одновременно несколько свойств надежности, называют комплексными. К ним относятся коэффициент готовности, коэффициент технического использования и др.

С позиций надежности изделия могут находиться в работоспособном, неработоспособном или предельном состоянии. *Работоспособным* называют состояние изделия, при котором значения всех параметров, характеризующие способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации. Если хотя бы один из названных выше параметров не соответствует требованиям нормативно-технической документации, изделие считают *неработоспособным.*

Переход от работоспособного состояния в неработоспособное происходит после наступления события, которое называют отказом. Отказом могут быть такие события, как перегорание электрической лампочки, нарушение газо- и теплоснабжения, "зависание" золотника в гильзе, снижение КПД и др.

Предельное состояние объекта — состояние, при котором дальнейшее применение данного изделия по назначению недопустимо или нецелесообразно. После наступления предельного состояния изделие можно списать или направить в капитальный ремонт. Предельное состояние может наступить в результате физического или морального изнашивания.

Представим себе машину, которая работала бы неограниченно долго без поломок и повреждения деталей, при отсутствии потери их размеров; по мере удешевления производства и выпуска машин с более высокими показателями она вследствие нерентабельности станет морально изношенной. Может оказаться, конечно, целесообразной ее модернизация.

В действительности работоспособность машины нарушается вследствие физического износа деталей; ее восстанавливают путем ремонта или замены деталей. С течением времени службы машины возрастает количество повреждений и число деталей, подлежащих ремонту и замене. Соотношение между стоимостью восстановления работоспособности машины и стоимостью новой машины возрастает, ремонт становится нерентабельным, и хотя конструктивно машина морально еще не изношена, но долговечность ее исчерпана.

Во многих случаях чем выше надежность машины, тем больше ее долговечность по физическому износу. Однако устройство может быть долговечным, безотказность его работы низкой. Например, двигатель внутреннего сгорания, обладая большой долговечностью, теряет свой ресурс вследствие быстрой засоряемости топливной системы и отказа ее в работе. Золотниковые пары механизмов и гидроусилителей могут обладать достаточной износостойкостью, но при попадании посторонних механических частиц в зазоры или при отложении смолистых веществ, выделяющихся из рабочей жидкости, сопротивление трению может превысить рабочие усилия в системе. Повреждения поверхностей деталей при этом отсутствуют. После промывки золотниковой пары ее работоспособность восстанавливается.

Узел трения может работать при повышенной температуре в результате больших сил трения. Даже не отражаясь на работе узла, это может вызвать недопустимый перегрев других деталей, обладающих невысокой теплостойкостью.

Вопросы повышения срока службы машин давно привлекали внимание инженерно-технических работников, однако в своей деятельности они руководствовались в основном эмпирическими данными. Развитие техники и машиностроения, в частности, придало проблеме повышения долговечности машин огромную значимость с точки зрения экономии материальных ресурсов и рабочей силы и приобщило к этой проблеме широкий круг конструкторов, технологов, эксплуатационников и ученых различных специальностей. Это позволило не только разработать конструктивные и технологические мероприятия по повышению срока службы машин и создать рациональные методы ухода за ними, но и на базе достижений физики, химии и металловедения заложить основы учения о трении, изнашивании и смазывании машин. Этой проблемой широко занимаются на заводах, в вузах и отраслевых научно-исследовательских институтах. Ей посвящают систематически проводимые совещания и конференции, по этим вопросам издают монографии и публикуют многочисленные журнальные статьи.

В отличие от высокого уровня постановки расчетов деталей и конструкций на прочность, жесткость и устойчивость современное состояние теории трения и изнашивания не дает конструктору надежных методов расчета сопряженных пар на износ и большинства изнашивающихся деталей на долговечность, на заранее предусматриваемый срок службы. Даже гидродинамическая теория смазки, развитие которой началось свыше 100 лет назад, не позволяет выполнить расчет подшипника с жидкостной смазкой с той же надежностью результатов, как расчет балки методами сопротивления материалов. Однако теория и инженерная практика повышения износостойкости и надежности работы трущихся деталей располагают большим количеством важных качественных зависимостей, результатов экспериментальных исследований и наблюдений, использование которых позволяет существенно повысить сроки службы машин. К сожалению, эти материалы не могут в полной мере использоваться вследствие их обширности и разрозненности. Систематизация, обобщение и представление их в доступной форме применительно к запросам студентов технических вузов, конструкторов, технологов и работников служб главного механика, заводских лабораторий и эксплуатационников — такую цель и имеет настоящее издание.

2. Основные термины

Триботехника — наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазки машин. В последние годы в триботехнике получили развитие новые разделы: трибохимия, трибофизика и трибомеханика.

Трибохимия — изучает взаимодействие контактирующих поверхностей с химически активной средой. Она исследует проблемы коррозии при трении, химические основы избирательного переноса и взаимодействие с поверхностью деталей химически активных веществ, выделяющихся при трении вследствие деструкции полимеров или смазочного материала.

Трибофизика — изучает физические аспекты взаимодействия контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении.

Трибомеханика — изучает механику взаимодействия контактирующих поверхностей при трении. Она рассматривает законы рассеяния энергии, импульса, а также механическое подобие, релаксационные колебания при трении, реверсивное трение, уравнения гидродинамики и др. применительно к задачам трения, изнашивания и смазки.

В некоторых странах вместо термина триботехника употребляют термины трибология и трибоника. В технической литературе встречается термин *динамическое металловедение* — это раздел металловедения, изучающий структуру и свойства поверхностных слоев металлов и сплавов в процессе трения.

Ряд терминов, относящихся к триботехнике, стандартизован. ГОСТ 23.002—78 включает 97 терминов, которые расклассифицированы по

видам трения, изнашивания, смазки, методам смазывания и смазочным материалам. К общим понятиям триботехники относятся следующие термины.

Внешнее трение — явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии.

Изнашивание — процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ — результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Величина износа может выражаться в единицах длины, объема, массы и др.

Износостойкость — свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Смазочный материал — материал, вводимый на поверхности трения для уменьшения силы трения и (или) интенсивности изнашивания.

Смазка — действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и (или) интенсивность изнашивания.

Смазывание — подведение смазочного материала к поверхности трения.

Трение покоя — трение двух тел при микроперемещениях до перехода к относительному движению.

Трение движения — трение двух тел, находящихся в относительном движении.

Трение без смазочного материала — трение двух тел при отсутствии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида.

Трение со смазочным материалом — трение двух тел при наличии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида.

Трение скольжения — трение движения двух твердых тел, при котором скорости тел в точках касания различны по величине и направлению, или по величине, или направлению.

Трение качения — трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и по направлению.

Сила трения — сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, направленной по касательной к общей границе между этими телами.

Наибольшая сила трения покоя — сила трения покоя, любое превышение которой ведет к возникновению движения.

Предварительное смещение — относительное микроперемещение двух твердых тел при трении в пределах перехода от состояния покоя к относительному движению.

Скорость скольжения — разность скоростей тел в точках касания при скольжении.

Поверхность трения — поверхность тела, участвующая в трении. *Коэффициент трения* — отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.

Коэффициент сцепления — отношение наибольшей силы трения покоя двух тел к нормальной относительно поверхностей трения силе, прижимающей тела друг к другу.

В 1979 г. в нашей стране издан словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин, содержащий более 1200 терминов [36].

3. Практические примеры решения задач триботехники

Повышенный износ деталей в сочленениях в одних случаях нарушает герметичность рабочего пространства машины (например, в поршневых машинах), в других — нарушает нормальный режим смазки, в третьих — приводит к потере кинематической точности механизма. В результате изнашивания понижается мощность двигателей, увеличивается расход горюче-смазочных материалов, падает производительность компрессоров, возникает возможность утечки ядовитых и взрывоопасных продуктов через сальники и уплотнения, понижаются тяговые качества транспортных машин, ухудшается управление самолетами и автомобилями (понижается безопасность движения), уменьшается производительность: снижается точность и качество обработки изделий на металлорежущих станках и т.д.

Износ инструмента и рабочих органов машин помимо снижения производительности повышает расход электроэнергии. Например, с износом и затуплением зубьев ковша экскаватора уменьшается сечение срезаемой стружки грунта, увеличивается сопротивление резанию последнего, требуется больший путь для заполнения ковша.

Износ и повреждение поверхностей снижают сопротивление усталости деталей и могут служить причиной их разрушения даже при незначительных концентраторах напряжений и весьма низких номинальных напряжениях. Повышенные износы нарушают нормальное взаимодействие деталей в узлах, могут вызвать значительные дополнительные нагрузки, удары в сопряжениях и вибрации, стать причиной внезапных разрушений. С повышенными износами нередко связан недопустимый шум машин. Заедание или заклинивание деталей может привести к аварийной ситуации. Так, заедание лопатки ротора масляного насоса может вызвать его заклинивание, прекращение подачи масла к подшипникам и аварию машины.

В многозвенных механизмах даже небольшой износ отдельных элементов может суммироваться на ведомом звене и нарушать нормальное функционирование механизма.

Износ цилиндропоршневой группы двигателя увеличивает засорение воздуха отработавшими газами: 100 изношенных автомобилей загрязняют воздух отработавшими газами, как 125 новых автомобилей.

Примечательно, что масса механизма или машины по мере их износа уменьшается незначительно. Например, автомобильный двигатель средней мощности после полного износа имеет потерю массы не более 1% от исходной, а грузовой автомобиль средней грузоподъемности — не более 3 кг.

Укажем некоторые примеры решения задач триботехники на промышленных предприятиях.

1. На одном из заводов, выпускающих мощные двигатели внутреннего сгорания, с некоторого времени в процессе обкатки двигателей на азотированных поверхностях цилиндров начали появляться мелкие задиры, что приводило к дымлению двигателей. Верхнее компрессионное кольцо поршня было хромированным, а остальные кольца выполнены из чугуна, легированного хромом, титаном и ванадием. Попытки устранить дымление двигателей увеличением времени их обкатки, улучшением микрогеометрии зеркала цилиндров, ужесточением допусков на конусность и овал цилиндров, очисткой масла от абразивных частиц и рядом других мер не дали результатов.

После длительных поисков причин задиров зеркала цилиндров было установлено, что в период обкатки цилиндры недостаточно смазывались маслом, что вызывало трение при полужидкостной смазке отдельных участков их поверхности. Нанесение мелких вмятин на юбке поршня стальным шариком диаметром 3 мм улучшило условия смазки и устранило задиры и дымление двигателей. С тех пор завод выпускает двигатели с накатанными углублениями на юбке поршня.

Более кардинальным методом было бы накатывание зеркала цилиндра, однако твердость азотированной поверхности зеркала препятствовала достаточной производительности этого процесса: накатной ролик изнашивался в течение 30...40 мин работы.

2. На самолете после 400...500 посадок в результате повышенного износа выходили из строя верхние бронзовые буксы амортизаторов шасси, что вынуждало ремонтировать амортизационные стойки с заменой букс. В целях уменьшения удельных нагрузок на буксу ее высота была увеличена в полтора раза. Однако эта мера не устранила повышенного износа букс. В результате поисков было установлено, что бронза БрАЖМц, из которой изготовляли буксы, имела очень низкую износостойкость в условиях смазки спиртоглицериновой смесью. Замена этой смеси на жидкость АМГ-10 устранила повышенный износ букс.

3. На паровой машине, установленной на судне, за 20...30 дней плавания из-за быстрого изнашивания выходило из строя верхнее поршневое кольцо, вызывая необходимость его замены. Из многих методов снижения износа поршневых колец в паровой машине действенным оказался лишь один. В чугунное кольцо сечением 40×40 был вставлен и зачеканен медный ручей 10×10 мм, выступающий на 0,5 мм над рабочей поверхностью кольца.

4. На одном из отремонтированных двигателей после работы его в течение 24 ч произошло самопроизвольное срезание фиксирующих штифтов бронзовых втулок и выпрессовывание последних из прицепного ша-

туна, что повлекло отказ двигателя. Узел сопряжения прицепного шатуна с главным представлен на рис. 1. Легко установить, что при вращении пальца прицепного шатуна во втулках не должно возникать осевых усилий. Выпрессовывание бронзовых втулок произошло в направлении, показанном стрелкой *А*. Смазочная система не была засорена абразивами, перегрева деталей не обнаружено, двигатель обкатывали строго по инструкции. При ознакомлении с технологией ремонта узла выяснилось, что бронзовые втулки прицепного шатуна были заменены новыми. Втулки изготовлялись на токарном станке и имели на рабочей поверхности канавки от резца. Рабочая поверхность пальца была цементирована, шлифована и полирована.

При осмотре деталей после аварии двигателя обнаружено, что поверхность трения бронзовых втулок имеет четкие следы механической обработки резцом (винтовая нарезка). Поверхность трения пальца была изношена, и на ней были полностью воспроизведены крупные канавки от бронзовых втулок.

Схватывания, переноса материала в паре трения бронзовые втулки — цементированный палец не наблюдалось. Не было также абразивных частиц на бронзовой втулке и следов перегрева. Металлографическим анализом установлено, что структура бронзы и ее твердость соответствовали техническим условиям.

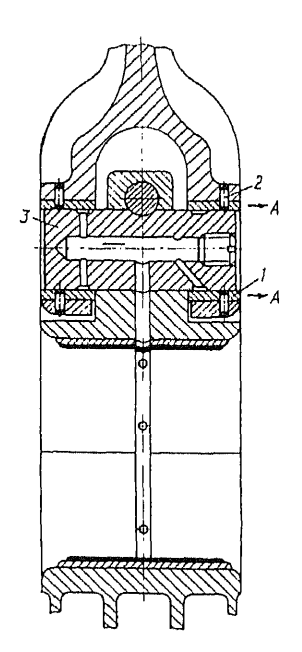


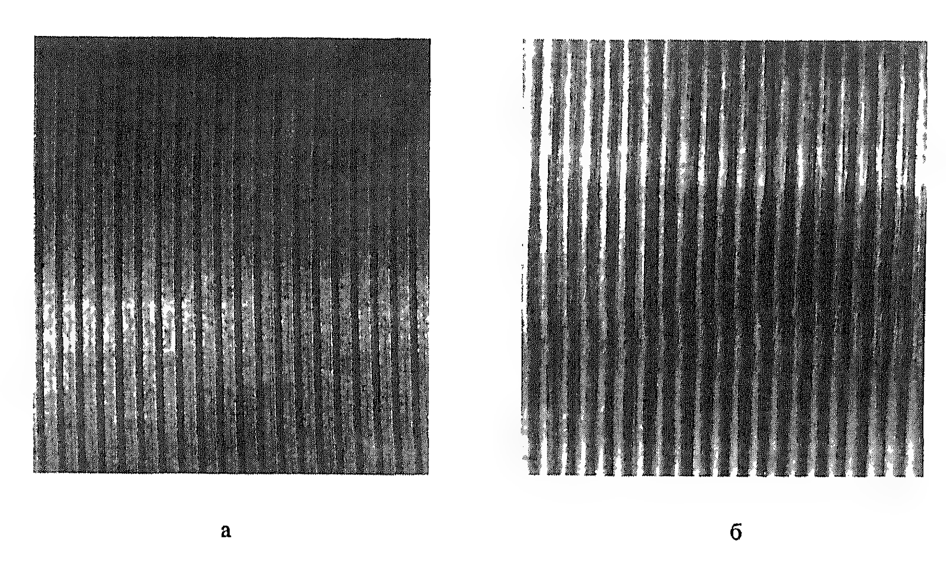
Рис. 1. **Узел сопряжения прицепного шатуна с главным:**
1 — бронзовая втулка; *2* — штифт; *3* — палец прицепного шатуна

На рис. 2. представлены поверхности трения бронзовой втулки и пальца прицепного шатуна. В результате интенсивного изнашивания пальца прицепного шатуна и почти полного отсутствия износа бронзовых втулок пара трения стала парой гайка — винт.

Это подтверждается профилограммами, снятыми с поверхности трения втулки и пальца прицепного шатуна (рис. 3). При вращении прицепного шатуна втулки стремились сдвинуться вдоль пальца, при этом осевая сила превысила силу среза двух фиксирующих бронзовых штифтов диаметром 3 мм.

Исследованиями установлено, что первоначальной причиной выпрессовывания бронзовых втулок явилось нарушение технологии их изготовления: параметр шероховатости поверхности втулок *Ra* 40...10 мкм вместо *Ra* = 0,63... 0,32 мкм. Однако физическая сущность явлений при трении пальца и бронзовых втулок до настоящего времени еще не раскрыта [7].

5. В практике эксплуатации керосиновых насосов были случаи катастрофически быстрого изнашивания поверхностей стальных закаленных роторов из стали 12ХН3А твердостью



а б

Рис. 2. **Поверхности трения бронзовой втулки (*а*) и стального цементированного пальца (*б*) после работы, ×8**

HRC 60 и бронзовых золотников твердостью НВ 61. Внешне разрушение проявлялось как износ стальной опоры ротора на глубину 0,03 мм и намазывание микроскопических лепестков стали на поверхность сопряженного бронзового золотника. Идентичность материала этих лепестков с материалом ротора была установлена спектральным анализом. На роторе по всей поверхности трения имелись относительно глубокие кольцевые царапины. Причины переноса твердого материала (стали и чугуна) на более мягкий материал (бронзу, пластмассу) в процессе трения в технической литературе не описаны. Анализ всех обстоятельств этого явления и изучение его закономерностей позволили установить новый вид контактного взаимодействия твердых тел, названного водородным изнашиванием [18, 45].



Рис. 3. **Профилограммы поверхностей бронзовой втулки (*а*) и стального пальца (*б*), ×28 по вертикали, ×30 по горизонтали**

6. Гидроэлектростанции вырабатывают самую дешевую электроэнергию. Они способны выходить на режим максимальной мощности в сотни раз быстрее, чем тепловые и атомные электростанции. Это особенно важно при автоматизированном управлении энергосистемами, прежде всего при возникновении и компенсации "пиковых" нагрузок. Такое преимущество в бóльшей степени зависит от надежной работы подпятников турбин (особенно при пуске), которые воспринимают вес ротора и водяной на-

пор — в общей сложности десятки меганьютонов. В ряде случаев, после 15...30, а иногда и после 2...3 пусков агрегат необходимо останавливать, разбирать и восстанавливать подпятник.

В настоящее время разработаны специальные системы, обеспечивающие гидростатическую разгрузку подпятников турбин. Применяют также эластичные металлопластмассовые опоры. Число безопасных пусков достигло 25 и более.

7. При проектировании грузоподъемных кранов столкнулись с трудностями в обеспечении надежной работы поворотного устройства крана грузоподъемностью в 250 т и наибольшей высотой подъема 100 м.

Обычно такое устройство состоит из нескольких рядов роликов, работающих по закаленной направляющей. Диаметр поворотного устройства был ограничен 3 м. При высоких нагрузках и малом диаметре поворотное устройство работало плохо — ролики заклинивались, и их поверхности и поверхности направляющих повреждались. Попытка применить различные смазочные материалы не привела к желаемым результатам. В.Н. Быстров и Е.И. Макаров предложили провести финишную антифрикционную безабразивную обработку (ФАБО) роликов и дорожек качения, а в смазку ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 8773 –73) ввести металлоплакирующую присадку МКФ-18У в количестве 0,3%. Это обеспечило надежную работу поворотного устройства, что позволило в короткие сроки изготовить уникальный автокран и пустить его в эксплуатацию.

4. Сроки службы трущихся деталей машин

Срок службы машины — календарная продолжительность эксплуатации изделия до разрушения или другого предельного состояния. Предельное состояние может устанавливаться по изменениям параметров, по условиям безопасности, по экономическим показателям, по необходимости первого капитального ремонта и т. п.

Выход из строя деталей и рабочих органов машин при нормальных условиях эксплуатации происходит вследствие различных видов физического износа: усталостных разрушений, ползучести материалов, механического износа, коррозии, эрозии, кавитации, старения материала и др.

Современное состояние теории рабочих процессов машин, наличие обширной экспериментальной техники для определения рабочих нагрузок и высокий уровень развития прикладной теории упругости при относительно хороших знаниях физических и механических свойств материалов позволяют обеспечить достаточную прочность деталей машин с большой гарантией от поломок их в нормальных условиях эксплуатации. Поэтому наиболее распространенной причиной выхода деталей и рабочих органов машин из строя является не поломка, а износ и повреждение рабочих поверхностей.

Несмотря на достигнутый прогресс в области увеличения срока службы машин, последний остается недостаточным. Так, продолжительность

работы авиационного поршневого двигателя до ремонта составляет 600...1000 ч. Отмечены факты крайне непродолжительного срока службы (менее 1000 ч) цилиндровых втулок мощных судовых дизелей. Наблюдались случаи выхода из строя в результате кавитационного разрушения крупных насосов и гребных винтов менее чем через год службы.

Особенно велик износ деталей и рабочих органов машин-орудий, которые эксплуатируются в абразивной и агрессивных средах, и деталей транспортных машин, работающих в условиях грязи и пыли. Например, срок службы камнедробилок составляет в среднем 3...4 мес., зубьев ковшей экскаваторов, ножей скреперов и бульдозеров, шнеков — 3...6 мес. На дробилке массой 6 т при дроблении высокоабразивных пород расходуется в год 17 т дробящих плит. Контрольные сроки службы до капитального ремонта угольных комбайнов и врубовых машин 8...12 мес., а транспортных устройств в угольных шахтах 2...3 года. Дизели, установленные на мощных автосамосвалах, требуют капитального ремонта после 1200...1500 ч работы, т.е. через 4...6 мес. Бортовые шестерни тракторов работают до замены не более 2000...2500 ч, срок службы тракторных трансмиссий до ремонта составляет 2500...3500 ч. За сезон работы тракторов на песчаных почвах приходится заменять два-три комплекта гусениц, что в среднем составляет 50% стоимости нового трактора. Лемех тракторного плуга в среднем обрабатывает до полного износа всего 15...20 га почвы, это вынуждает ежегодно изготовлять для сельского хозяйства свыше 20 млн. лемехов, не говоря уже о том, что на тяжелых почвах режущая кромка лемеха требует ремонта через 4...6 ч работы плуга. Годовая потребность в запасных звеньях приводных цепей сельскохозяйственных машин составляла около 100 млн шт.

В свеклорезках ножи из углеродистой стали требуют переточки с последующей термообработкой через каждые 1...2 мес. работы, что вызывало их расход в сахарной промышленности до 1 млн шт. в год. Шнековые винты и веерные колосники из стали 20Х маслоотжимных прессов непрерывного действия служат 3...6 мес.

Малую продолжительность работы имеют проволочные канаты грузоподъемных машин, в особенности машин на металлургических предприятиях. Средний срок службы канатов доменных подъемников 3...4 мес., разливочных кранов мартеновских цехов 6...7 мес. при разливке трехчетырех плавок в сутки.

Опыт показывает, что при хорошем уходе за техникой (с учетом правильной конструкции) машины могут эксплуатироваться в тяжелых условиях без аварий в течение многих лет. Так, по данным П. И. Коха, на Ново-Соликамском калийном заводе шахтные вагонетки массой 2 т служат 11...12 лет, а скреперные лебедки — 22...23 года. По 13...14 лет работают без капитального ремонта экскаваторы на разрезах треста "Коркинуголь". Однако это лишь единичные примеры. В целом же за весь срок службы горного оборудования на его ремонт требуется средств в 10... 12 раз больше, чем на выпуск новых машин. Имеется лишь один путь сокращения этих затрат — повысить показатели надежности.

5. Убытки от трения и износа в машинах

Большинство машин (85...90%) выходит из строя по причине износа деталей. Расходы на ремонт машин, оборудования и транспортных средств составляют в нашей стране десятки млрд руб. в год. При развитии промышленности эта цифра естественно увеличивается. Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в несколько раз превышают ее стоимость: для автомобилей в 6 раз, для самолетов до 5 раз, для станков до 8 раз [32].

На долю заводов, выпускающих новые тракторы, приходится лишь 22% мощностей, на долю заводов, изготовляющих запасные части к тракторам, 34%, а на долю ремонтных предприятий — 44%. Иначе говоря, на ремонт тракторов затрачивается почти в 4 раза больше производственных мощностей, чем на их изготовление.

Трудоемкость ремонта и технического обслуживания многих строительных и дорожных машин за срок их службы примерно в 15 раз превышает трудоемкость изготовления новых [20]. Создание машин, не требующих капитальных ремонтов за весь срок их службы, и значительное сокращение текущих ремонтов по своей технико-экономической эффективности равноценны удвоению мощности машиностроительных заводов и увеличению выпуска металлов на многие миллионы тонн в год. Одна треть станочного парка находится в ремонтных предприятиях. На запасные части расходуется более одной пятой выплавляемого металла.

Простои автомобилей из-за технических неисправностей в некоторых автомобильных хозяйствах достигают 30...40% календарного времени. На каждые 1000 простаивающих грузовых автомобилей омертвляется почти 3 тыс. т металла и 417 т резины.

Народное хозяйство нашей страны ежегодно потребляет около 5 млн вентилей, уплотнительные устройства которых работают на трение и износ. Обследование, проведенное Академией коммунального хозяйства, показало, что почти 90% регулируемых кранов вентилей работают плохо или совсем не работают. На производство вентилей расходуется более 5 млн руб. в год и около 1500 т цветных металлов. Причинами плохой работы вентилей являются конструктивное несовершенство, низкое качество изготовления и использование низкосортных металлов. Однако главные расходы народное хозяйство несет не на изготовление вентилей, а в результате того, что они не выполняют свои функции. Подсчитано, что при хорошей работе вентилей можно сократить расход теплоты для жилых домов на 10%, это позволило бы сберечь до 6 млн т условного топлива в год или более 130 млн руб.

В настоящее время дизели Д-240 имеют ресурс 10000 моточасов и выше. Такой показатель достигнут благодаря тому, что на заводах по изготовлению двигателей была проведена огромная работа по повышению срока службы основных деталей двигателя: введена закалка гильз цилиндров и шеек коленчатых валов, хромирование верхнего компрессионного кольца, применена центробежная очистка масла в шатунных шейках коленчатых валов, введены реактивные масляные центрифуги и т.д. Одна-

ко не все дизели, изготовленные на заводах серийной продукции, работают по 10000 моточасов. Многие из них имеют ресурс 7...8 тыс. моточасов. После ремонта двигатели работают очень мало, всего 3...4 тыс. моточасов. Причиной является недостаточная культура эксплуатации и низкое качество ремонта.

Касаясь двигателей автомобилей, тракторов и комбайнов, следует отметить, что за весь срок службы их ремонтируют до 5 раз. Ресурс двигателя после ремонта по сравнению с ресурсом нового двигателя составляет 40…50%. Число рабочих, занятых ремонтом двигателей, в несколько раз превышает число рабочих, изготовляющих двигатели на заводах серийной продукции. Материальные затраты на ремонт также во много раз превосходят затраты на изготовление нового двигателя. В целом по стране на автомобилях, тракторах и комбайнах отремонтированных двигателей в 2 раза больше, чем новых.

Причинами малого ресурса двигателей после ремонта являются:

низкое качество обработки трущихся поверхностей деталей; станки ремонтных предприятий не обеспечивают той точности обработки, которую имеют детали, изготовленные на заводах серийной продукции;

отсутствие средств надежной промывки деталей перед сборкой, запыленность абразивной пылью сборочных цехов, в целом — невысокая культура производства;

плохая приработка деталей после ремонта, отсутствие современных испытательных стендов, приборов, контролирующих процесс приработки, загрязненность абразивами смазочных и гидравлических систем;

недостаточная специализация производства на ремонтных предприятиях по сравнению с ее уровнем на заводах серийной продукции, что не позволяет разрабатывать и реализовывать наиболее рациональные технологические процессы, недочеты в этом вопросе проявляются, в первую очередь, в малом сроке службы деталей.

В настоящее время автомобильные двигатели ремонтируют многие предприятия различных министерств и ведомств. Многие из них — мелкие, универсальные мастерские с преобладанием ручного труда. Указанные причины приводят к тому, что ресурс двигателя на 20. ..30% вырабатывается за первые часы его работы.

Указанные факторы, снижающие ресурс двигателей после ремонта, известны и устраняются. Но это очень длительная, кропотливая и трудоемкая работа, требующая многих лет. Считая это направление правильным и необходимым, не следует забывать принципиально новые пути, которые позволяют повысить ресурс двигателей после ремонта (см. 2-ю часть книги).

Интересны данные по распределению объема трудовых затрат на весь срок службы автомобиля: на изготовление — 1,4%, на техническое обслуживание — 45,4% на текущий ремонт — 46%, на капитальный ремонт —7,2 %.

Большие материальные потери народное хозяйство терпит от повышенного трения в узлах машин. Известно, что больше половины топлива, потребляемого автомобилями, тепловозами и другими видами тран-

спорта, расходуется на преодоление сопротивления, создаваемого трением в подвижных сочленениях. В текстильном производстве на преодоление сопротивления трения затрачивается около 80 % потребляемой энергии. Низкие КПД многих машин обусловлены, главным образом, большими потерями на трение. Так, КПД глобоидного редуктора, устанавливаемого в лифтах, металлорежущем оборудовании, шахтных подъемниках и др., в приработанном состоянии составляет только 0,65...0,70, а в такой распространенной паре, как винт — гайка, всего лишь 0,25.

Согласно работам П. С. Зака и др. увеличение КПД червячных редукторов за счет повышения их качества только на 4 % в масштабе народного хозяйства даст экономию за счет сокращения расхода электроэнергии более 25 млн руб. в год.

Велики потери в результате снижения мощности двигателей от износа деталей. По данным С.А. Серова, суммарная мощность двигателей внутреннего сгорания, установленных только на автомобилях, тракторах и различных самоходных установках, достигает в нашей стране 0,5 млрд кВт.

Эта мощность учитывается по номиналу в соответствии с паспортными данными. На самом же деле у подавляющего большинства машин в результате износа, плохой регулировки, неправильной эксплуатации мощность двигателей в среднем на 10...15% ниже номинальной. Следовательно, в масштабе всего народного хозяйства потери мощности двигателей превышают 100 млн кВт, а с учетом нормативных простоев машин — до 300 млн кВт.

Изношенные двигатели внутреннего сгорания при работе значительно больше загрязняют атмосферу отработавшими газами, чем новые двигатели.

При рассмотрении вопроса об экономическом значении борьбы с изнашиванием машин С. Баходур [4] приводит размеры ежегодных затрат в США (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Объекты	Число объектов $n \cdot 10^{-3}$	Затраты, млрд долларов
Самолеты*	200	13,4
Суда	4	6,4
Режущий инструмент**	500	2,8
Автомобили	133000	24,2
Итого		46,8

* С учетом неплановых, плановых и капитальных затрат на износ.

** Быстрорежущие стальные резцы и резцы из спеченного карбида.

Профилактическое обслуживание машин и механизмов становится все более целесообразным с точки зрения экономии ресурсов рабочей силы, расходуемых материалов и увеличения долговечности. Опыт эксплуатации вертолетов средних размеров показывает, что 30% времени теряется на непредусмотренное обслуживание [4]. Считая, что стоимость работы вертолета составляет 1000 долл. в ч, нетрудно оценить потери от таких операций. Аналогичные сравнения могут быть сделаны для самолетов и тяжелого оборудования [4].

На симпозиуме, проведенном в США в 1976 г. по вопросу снижения износа в технике, общее мнение свелось к тому, что управление изнашиванием является центральным звеном решения таких национальных проблем, как экономия энергии, сокращение расхода материалов, а также обеспечение надежности и безопасности механических систем. На симпозиуме отмечалось, что для промышленности США возможная экономия за счет эффективного внедрения результатов триботехники в практику составит 12...16 млрд долл.

В Великобритании в 50-х гг. была проведена работа в рамках государства по внедрению достижений триботехники. Согласно отчету Британского совета по триботехнике, опубликованному в 1966 г., экономический эффект от применения достижений триботехники составляет более 500 млн фунтов стерлингов (табл. 1.2), что эквивалентно 2% валового национального продукта.

Таблица 1.2

Результаты внедрения достижений триботехники в практику	Годовой экономический эффект, млн фунтов стерлингов
Снижение потребления энергии за счет уменьшения трения	28
Сокращение ручного труда	10
Снижение затрат на смазочные материалы	10
Снижение затрат на обслуживание и ремонт	230
Исключение потерь, связанных с поломками оборудования	115
Экономия вложений за счет более интенсивного использования оборудования и большого КПД	22
Экономия вложений за счет повышенной долговечности машин	100
Итого	515

Большие потери от износа машин и механизмов несет промышленность ФРГ. В 1974 г. в сталелитейной промышленности на замену изношенного оборудования было израсходовано более 1,4 млрд марок, что вместе с потерями, вызванными простоями, привело к удорожанию продукции прокатного оборудования на 10...20% (1 ч простоя прокатного обо-

рудования стоит 20 тыс. марок). В угольной промышленности потери от износа равны 10 млрд марок в год, а во всей промышленности ФРГ — более 100 млрд марок, т. е. свыше 1% годового бюджета. Снижение потерь энергии в двигателях внутреннего сгорания на 10% позволит сэкономить 0,5 млрд марок в год, а применение правильных триботехнических рекомендаций снизит на 50% годовые затраты, вызванные износом.

В 1976 г. в ФРГ была создана государственная программа по сохранению материальных ресурсов в результате решения триботехнических проблем. В первоначальном варианте было сформулировано около 80 проблем по разделам трения без смазочного материала, гидродинамической и полужидкостной смазки, смазочных материалов, методам измерения и исследования трения и изнашивания. Субсидии составили 84 млн марок на срок до 1984 г. В результате должны быть решены задачи увеличения долговечности и межремонтных периодов, сохранения редких металлов и энергии, снижения вибрации и шума в машинах.

Для выполнения программы были созданы координационные группы: 1) абразивное изнашивание; 2) вибрационное изнашивание; 3) подшипники и цилиндропоршневая группа; 4) эластогидродинамика; 5) полужидкостная смазка; 6) техника измерений и методы испытаний; 7) подшипниковые материалы; 8) обработка поверхностей; 9) смазочные материалы двигателей внутреннего сгорания; 10) технологические операции; 11) поведение фрикционных систем; 12) дизельные машины.

6. Этапы развития триботехники в России

Триботехника, как и другие науки, непрерывно развивается. Этапы ее развития связаны с созданием корабельной техники, металлообрабатывающей промышленности, железнодорожного транспорта, автомобильной промышленности, авиации и космонавтики.

В России основы науки о трении и изнашивании были заложены в период организации Российской академии наук. Великий ученый М.В. Ломоносов сконструировал прибор для исследования сцепления между частицами тел "долгим стиранием", который явился прототипом современных приборов для определения износостойкости материалов. М.В. Ломоносов является основоположником теории изнашивания материалов и экспериментальных исследований в этой области, он связал понятие о прочности с представлениями о силах связи между частицами. Занимаясь подбором материалов для опор часовых механизмов, М.В. Ломоносов указал на целесообразность применения для этой цели стекла.

Крупный вклад в науку о трении внес Л. Эйлер. Выведенные им зависимости о трении гибкой нерастяжимой нити, перекинутой через шкив, до сих пор применяют во всем мире при расчете сил трения в элементах с гибкой связью.

Мировую известность получили работы Н.П. Петрова по теории смазки подшипников. Над проблемой смазки работали Н.Е.Жуковский и С.А. Чаплыгин, математически разработавшие вопрос о теории смазоч-

ного слоя (за границей над гидродинамической теорией смазки работали О. Рейнольдс, А. Кингсбери, Герси и др.).

В период развития индустрии в России широко развернулись работы в области триботехники. Первый обзор о развитии учения о трении и изнашивании в нашей стране был выполнен в 1947 г. профессором Ленинградского политехнического института А.К. Зайцевым в книге "Основы учения о трении, износе и смазке машин" [17]. В 1956 г. И.В. Крагельский и В.С. Щедров опубликовали монографию "Развитие науки о трении", в которой отмечают, что трение представляет собой сложную совокупность многих физических явлений, и раскрывают путь развития научной мысли в этом направлении с XVI в. до 40-х гг. нашего столетия. Монография о трении без смазочного материала написана указанными авторами по первоисточникам с глубоким анализом русских и зарубежных работ и получила признание во многих странах.

В 1957 г. в сборнике "Теоретические основы конструирования машин" М.М. Хрущов дал обзор о "Развитии учения об износостойкости деталей машин", в котором последовательно изложил развитие работ в области износостойкости по отдельным наиболее разработанным вопросам: развитие представлений о причинах и процессах изнашивания; исследование влияния шероховатости обработанной поверхности деталей машин на износ металлов; исследование абразивного изнашивания и изнашивания при схватывании; методы испытания на изнашивание; антифрикционные материалы и методы расчета деталей машин на износ [43].

Б.И. Костецкий и его ученики в 1976 г. в книге "Поверхностная прочность материалов при трении" (Киев, "Техника") обобщили работы по изучению процессов трения и поверхностного разрушения, а также по вопросам образования вторичных структур при трении в условиях граничной смазки. Отмеченные вопросы рассмотрены более подробно в работе [30].

На основе приведенных литературных источников, а также анализа опубликованных трудов конференций, семинаров и др. можно подразделить вопросы развития триботехники на следующие части, которые содержат самостоятельные этапы [37]:

1) учение о трении и изнашивании деталей машин;
2) конструктивные решения вопросов трения и изнашивания;
3) технологические методы повышения износостойкости деталей;
4) эксплуатационные мероприятия по повышению долговечности машин.

6.1. Учение о трении и изнашивании деталей

Первые элементарные представления о трении и изнашивании исходили из чисто механической точки зрения, согласно которой механизм явлений заключается в том, что при скольжении неровности одной поверхности зацепляются за неровности сопряженной поверхности, что приводит к срезанию и выламыванию неровностей. В результате вырывов образуются новые неровности. Процесс продолжается с возможным выглаживанием поверхностей трения.

Еще в 20-х гг. нашего столетия изнашивание представлялось как сочетание двух одновременно протекающих процессов — истирания и смятия. Под первым подразумевали отрыв или срезание частиц с последующим их удалением.

Мерой истирания служит потеря массы изнашиваемого объекта. Под смятием понимают изменение линейных размеров, происходящее без потери массы, за счет расплющивания.

Механическая теория противоречила некоторым фактам и не в состоянии была объяснить ряд других. Например, механической точке зрения противоречит часто наблюдаемое повышение интенсивности изнашивания при доведении поверхностей трения до очень малой шероховатости; остается неясным, почему при трении некоторых пар без смазочного материала при переходе через определенную скорость скольжения интенсивность изнашивания падает.

Ложное представление об исключительной роли зацепления неровностей поверхностей в процессах трения и изнашивания создается у многих и в настоящее время при рассмотрении профилограмм обработанных поверхностей. Эти профилограммы снимают при больших (2400) вертикальных увеличениях и при малых (50) горизонтальных. В действительности же зацепления у поверхностей с параметром шероховатости Ra = 0,32...0,04 мкм практически не может быть, так как угол неровностей (угол между касательной к выступу неровности и горизонталью) у основания составляет всего лишь 1...2°.

Эксперименты по трению и изнашиванию металлов, проведенные в 30-х гг. М. Финком, установили повышенную окисляемость металлов при трении. Это побудило ряд авторов считать химические процессы наиболее важными в кинетике изнашивания. Работы в этом направлении проводились Б.И. Костецким и его учениками [30], И.В. Крагельским и Е.М. Швецовой [44], Г.В. Виноградовым и многими другими.

В 1947 г. вышел в свет труд В.Д. Кузнецова [24], в котором изложены вопросы физики внешнего трения и изнашивания и внутреннего трения твердых тел. На основании анализа основных работ по трению и изнашиванию В.Д. Кузнецов пришел к неутешительному выводу, что в области изучения изнашивания господствует почти чистый эмпиризм. Он пишет, что "...специалисты по износу считают, что износ можно изучить только эмпирически, путем проб, путем постановки таких экспериментов, условия которых близки к тем, которые встречаются на практике. При чтении литературы по износу получается такое впечатление, что в этой области принципиально не может быть никаких общих законов, а следовательно, не имеет смысла делать попытку вводить в эту область какие-либо теоретические представления, на основании которых можно заранее предсказать и вычислить износ".

Далее В.Д. Кузнецов пишет, что "задача научных исследований и заключается в том, чтобы раскрыть природу износа, выявить общие закономерности и уметь заранее предсказать износ в отдельных случаях. Если мы не переключимся на этот путь, то никогда не будем в состоянии сдвинуть науку об износе с мертвой точки. Процесс изнашивания — очень

сложный процесс, и если мы будем ставить наши опыты так, что в них будет воспроизводиться вся сложность процесса, то можно априори сказать, что из этого ничего не выйдет. Необходимо опыты ставить так, чтобы сложность процесса была расчленена и чтобы в каждом опыте доминирующую роль играла какая-то, по возможности одна, часть процесса. Только изучив части процесса, мы можем понять процесс изнашивания в его сложном виде". По-видимому, слова В.Д. Кузнецова и в настоящее время не потеряли своей актуальности при изучении механизма изнашивания твердых тел.

Известным достижением в области обобщения отечественной и зарубежной литературы по трению и износу металлов явилась книга Д.В. Конвисарова [22], в которой рассматриваются некоторые вопросы трения твердых тел в свете теоретической механики. В основном же книга посвящена проблеме физико-химического взаимодействия металлов при статическом, кинетическом трении первого и второго рода со смазочным материалом и без него.

Под руководством И.В. Крагельского в нашей стране выполнена огромная работа по разработке расчета деталей на износ. Сложность состоит в том, что трудно, а в некоторых случаях почти невозможно учесть физико-химические процессы в зоне контакта, что, естественно, снижает точность расчета. Имеются и негативные взгляды. Известный специалист в области износа Д. Тейбор в заключение критического обзора об износе [38] отмечает, что глубокие изменения физических и химических свойств скользящих поверхностей делают прогнозирование износа чрезвычайно затруднительным, и по этим причинам проблема расчета на износ данной системы по свойствам материалов и рабочим условиям еще не будет решена в ближайшие годы.

В связи с изложенным некоторые авторы расчет на износ деталей выполняют экспериментально-аналитическими методами. Основополагающей в этом направлении является работа [32]. Предпринимаются также попытки выполнить расчет на износ с учетом многих физико-химических процессов в зоне контакта [13].

Глубокие исследования по изнашиванию твердых тел с учетом среды были выполнены П.А. Ребиндером и его учениками [25]. Еще в 30-х гг. П.А. Ребиндер открыл адсорбционный эффект понижения прочности твердых тел: благодаря адсорбции поверхностно-активных веществ понижается поверхностная энергия твердого тела, что приводит к облегчению выхода дислокаций. Все это имеет большое значение для познания природы трения и изнашивания металлов. Диспергирование металла при трении может быть усилено или ослаблено поверхностно-активными веществами во много раз. Работы П.А. Ребиндера и его учеников нашли широкий отклик во всем мире у специалистов не только по прочности материалов, но и по обработке материалов, трению и изнашиванию. На базе работ П.А. Ребиндера сформировалась новая наука — физико-химическая механика материалов, охватывающая вопросы физики, химии и механики в части создания и эксплуатации новых материалов.

Крупным вкладом в раскрытие механизма трения и смазки явилось опубликование в 1962 г. книги А.С. Ахматова [3]. Монография подытожила состояние науки в области трения при граничной смазке и явилась первой работой такого рода в отечественной и зарубежной литературе. Несмотря на то, что с момента опубликования книги прошло более 30 лет, она не потеряла своей актуальности и является настольной книгой специалистов по трению и изнашиванию. В книге с большой четкостью показано, что поверхности деталей, не подвергавшиеся специальной очистке, всегда несут адсорбционные слои паров, газов и жидкостей; эти слои в значительной степени определяют течение многих механических и технологических процессов. Граничные слои оказывают существенное влияние не только на процесс трения, но и на структуру металла в поверхностных его слоях.

Успехи в разработке физической стороны процесса трения, привлечение современных методов физического эксперимента к опытному изучению трения, подробное физико-химическое исследование природы поверхностных слоев твердого тела и накопленный большой экспериментальный материал позволили глубже познать механизм трения и изнашивания.

Основополагающей работой научного направления в области трения и изнашивания, развиваемого проф. И.В. Крагельским и его учениками, является работа Е.М. Швецовой и И.В. Крагельского [44]. Процесс изнашивания, согласно этой работе, расчленяется на три явления: взаимодействие поверхностей трения; изменения, происходящие в поверхностном слое; разрушение поверхностей. Эти явления не следует рассматривать как последовательные этапы, они непрерывно переплетаются, взаимно влияя друг на друга. Разумеется, взаимодействие поверхностей сопровождается в условиях относительного перемещения определенными изменениями. Точно так же разрушение является завершающим этапом изнашивания. Поскольку разрушением не охватывается одновременно вся поверхность трения (оно происходит, как правило, в отдельных участках), другие участки поверхности претерпевают только физико-химические изменения.

По всем трем явлениям проведены большие исследовательские работы, опубликованы многочисленные статьи и написано несколько монографий. В целом это направление именуется как молекулярно-механическая теория трения и изнашивания, цель которой дать инженерный расчет на трение и износ. Эта задача еще далека от завершения. Тем не менее молекулярно-механическая теория трения и изнашивания наиболее полно отражает физическую картину изнашивания в режимах трения при граничной смазке и без смазочного материала.

Б.И. Костецкий и его ученики выпустили монографию [30], в которой подводят итоги своим ранним работам по вопросам образования вторичных структур при трении в условиях граничной смазки, а также раскрывают перспективы использования вторичных структур как экранирующей защиты от разрушения основного материала пары трения.

Авторы отмечают, что поверхностный слой трущихся деталей в процессе трения резко изменяет свою структуру и переходит в активное состояние. Материал стремится немедленно перейти из термодинамически неравновесного в пассивное состояние путем адсорбционного, диффузионного или механического взаимодействия с внешней средой. Этот новый слой и становится объектом поверхностного разрушения при трении. Если процессы разрушения охватывают только новый слой, образовавшийся в процессе трения, то происходит нормальное трение, к чему и надо стремиться. Если же разрушение поверхности происходит вне зоны образовавшегося нового слоя (например, при схватывании, микрорезании, фреттинг-процессе и др.), то изнашивание протекает ненормально — с повреждаемостью поверхности детали.

Образование в процессе трения новых слоев, главным образом в результате окислительных процессов, Б. И. Костецкий и его ученики относят к явлению “универсальной структурной приспособляемости материалов”. Универсальность этого явления, по мнению авторов, состоит в том, что оно реализуется при трении любых материалов в определенном, зависящем от вида этих материалов диапазоне нагрузок и скоростей взаимного перемещения. Диапазон нормального трения зависит от состава и концентрации вакантных компонентов внешней среды и от температуры. Характеристики внешней среды могут расширять или сужать диапазон явления структурной приспособляемости и менять уровень нормального трения и износа.

Б.И. Костецкий и его ученики не утверждают возможность создания условий безызносного трения, отмечая, что вторичные структуры экранизируют исходный материал от механической и физико-химической деструкции, а внешнее механическое воздействие неизбежно приводит к разрушению вторичных структур, однако эти же воздействия и процессы переноса вещества из среды обеспечивают регенерацию экранирующей фазы. Перевод узлов трения в режим структурной приспособляемости может снизить износ узла трения и тем самым повысить его долговечность.

Анализ материалов, относящихся к структурной приспособляемости, свидетельствует о том, что не все структурные изменения, происходящие на поверхностях трения, являются экраном и способствуют снижению износа в условиях трения при граничной смазке и без смазочного материала. Наклеп поверхности детали, неизменно сопровождающий трение, является одним из факторов предразрушения поверхности. Образование гидрофильной зоны и наводороживание являются причинами износа. И, наконец, окисление поверхности создает хрупкие пленки, которые хотя и экранируют поверхности от схватывания, но сами имеют низкую износостойкость. Кроме того, необходимо было бы установить области целесообразного применения структурной приспособляемости и ее эффективность, однако этого не было сделано Б.И. Костецким и его учениками.

Научная школа по триботехнике, возглавляемая В.А. Белым, проделала огромную работу по использованию полимерных материалов для

узлов трения. Полимеры обладают по сравнению с металлами более низким коэффициентом трения, меньше изнашиваются, нечувствительны к ударам и колебаниям, имеют меньшую стоимость и более технологичны в производстве деталей.

Способность полимеров работать при смазке водой является важным их преимуществом перед металлами. Однако необходимо учитывать определенные трудности их использования. Известно, что пластмассы при доступе воды склонны к набуханию, имеют низкую теплопроводность, большой температурный коэффициент линейного (или объемного) расширения, невысокую теплостойкость, обладают ползучестью при нормальной температуре и низким модулем упругости. Таким образом, прямая замена металла полимерами не всегда целесообразна.

Выбор деталей, изготовленных из полимеров, должен базироваться на глубоких исследовательских и конструкторских проработках. Во многих случаях деталь из пластмассы не должна повторять форму металлической, а конструироваться с учетом специфики полимерного материала. Сам же материал должен изготовляться с учетом конструкции деталей и условий ее работы — путем подбора рецептуры (стабилизаторы, пластификаторы, наполнители и др.) и создания необходимой микроструктуры. Для узлов трения наиболее перспективны комбинации полимеров с другими материалами.

Все отмеченные выше и многие другие вопросы были обобщены в ряде монографий и многочисленных публикациях в периодической российской и зарубежной печати [5, 11, 40, 41]. Особое внимание уделено физико-химическим процессам, сопровождающим образование и разрушение фрикционных связей в металлополимерных системах. Рассмотрены новые методы направленного регулирования структуры и фрикционных свойств металлополимерных материалов.

Характерной особенностью рассмотренной научной школы является ее тесная связь с практикой. Каждое новое научное достижение здесь стремятся довести до практической реализации.

Кроме указанных научных школ И.В. Крагельского и В.А. Белого по триботехнике, в России последнее время сформировались новые научные направления: расчет деталей на износ — МГТУ им. Н.Э. Баумана (А.С. Проников), Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Ю.Н. Дроздов); контакт деталей и физика изнашивания — Калининский Государственный технический университет (Н.Б. Демкин); тепловая динамика трения — Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (А.В. Чичинадзе); абразивное изнашивание в условиях удара — Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина (В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин); износостойкость деталей узлов трения железнодорожного транспорта — Ростовский государственный университет инженеров железнодорожного транспорта (В.И. Колесников, Ю.А. Евдокимов); физические процессы в зоне фрикционного контакта металлов — Институт прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской АН (В.Е. Панин); износостойкие и приработочные покрытия, реализующие избирательный перенос — Московский государ-

ственный университет сервиса (А.К. Прокопенко); технологические методы повышения износостойкости криогенной техники — Омское объединение "Сибкриогентехника" (Б.Т. Грязнов); износостойкость деталей сельскохозяйственной техники — Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина (М.Н. Ерохин, В.В. Стрельцов) и Саратовский государственный агроинженерный университет (В.И. Цыпцын); связь структуры металлов с износостойкостью — Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова) и др.

6.2. Оптимизация конструктивных решений узлов трения

По-видимому, первым среди конструкторов, обратившим серьезное внимание на связь износостойкости с конструкцией узлов трения, был П.И. Орлов. Его книга [27], ставшая библиографической редкостью, содержит ценный материал для конструкторов по вопросам конструктивных форм подшипников, конструирования высокоизносостойких скользящих опор, теории трения качения. Она до сего времени не потеряла интереса как в части ярких конструкторских приемов, обеспечивающих путем рационального использования смазочного материала в узлах машин высокую надежность трущихся деталей, так и в утверждении, что в вопросах конструирования и в особенности в технике смазывания "мелочей" вроде течи масла из уплотнений, повышенного расхода при выбрасывании масла из суфлеров и т.п. не должно быть. Ибо это задерживает доводку новых машин и затрудняет работу обслуживающего персонала.

В последующих трех книгах П.И. Орлова по конструированию машин "Основы конструирования" также уделено много внимания резервам надежности и долговечности при конструировании машин. В них утверждается руководящая роль конструктора в решении вопросов долговечности машин.

В работах М.М. Тененбаума начиная с 1966 г. проводилась систематизация конструктивных способов обеспечения высокой износостойкости машин. Все способы подразделены на следующие группы: исключение внешнего трения; улучшение условий трения; равностойкость изнашивающихся деталей; оптимизация форм деталей; компенсация износа; резервирование износостойкости; индикаторы износа [39].

М.М. Тененбаум подчеркивал, что решение прикладных задач должно основываться на закономерностях динамики изнашивания деталей и влияния конструктивных параметров на их износостойкость. Он развивал новое направление в изучении износостойкости материалов, которое можно назвать конструктивной износостойкостью.

В конструктивные факторы входит и расчет деталей на износ, методика которого наиболее полно разработана А.С. Прониковым [32]. В качестве исходной физической закономерности (подобно закону Гука в прочности) им принят закон изнашивания, который связывает изнашивание с рядом параметров, включая фактор времени, и относится к материалам

двух сопряженных поверхностей. Износ сопряжения характеризуется одним параметром $v_{1\text{-}2}$ — величиной относительного сближения изнашиваемых деталей 1 и 2 в направлении, перпендикулярном к поверхности трения. Поскольку скорость скольжения и давления деталей в разных точках не одинаковы, поверхность детали изнашивается неравномерно. В связи с этим будет меняться и первоначальная форма детали, что усложняет последующее протекание процесса трения. Все виды сопряжений с точки зрения условий изнашивания А.С. Проников разделяет на пять групп по двум типам. Он разработал типовые расчеты этих групп деталей на износ. Трудности расчетов связаны с параметром $v_{1\text{-}2}$, который необходимо определять экспериментальным путем. Ряд обобщений по влиянию конструкции узла трения на его работоспособность и долговечность имеется в работах [34, 37].

6.3. Технологические методы повышения износостойкости деталей

Наука и техника располагают многочисленными технологическими средствами для повышения износостойкости деталей. К основным технологическим мероприятиям, повышающим долговечность машин, можно отнести: применение современных методов создания прочных материалов для различных условий эксплуатации машин и получения из них заготовок высокого качества, близких по форме и размерам к готовым деталям; применение современных технологических приемов, обеспечивающих изготовление деталей заданной точности и стабильности как по размерам, так и по физико-механическим свойствам; применение современных методов контроля качества материалов, заготовок и готовых изделий по соответствующим показателям надежности; применение процессов упрочняющей обработки для получения требуемого качества рабочих поверхностей деталей машин с высоким сопротивлением изнашиванию и поломкам в различных условиях эксплуатации.

Технологические методы повышения износостойкости деталей машин накапливались постепенно в течение десятилетий развития машиностроения. Эти методы обобщены в монографиях [9, 16], и их можно сгруппировать следующим образом:

химико-термическая обработка: цементация, азотирование, хромирование, цианирование, силицирование, алитирование, сульфоцианирование и сульфидирование и др.;

термическая обработка: пламенная поверхностная закалка, высокочастотная закалка, поверхностная закалка с нагревом в электролите, лазерное упрочнение;

химическая обработка: глубокое анодирование, оксидирование, фосфатирование;

поверхностное пластическое деформирование: обкатка шариками и твердосплавными роликами, дробеструйная обработка, алмазное выглаживание, упрочнение чеканкой, гидрополирование, обработка поверхности взрывным нагружением;

электроискровое упрочнение;

гальванические покрытия: хромирование, никелирование, железнение, борирование, родирование, серебрение, лужение, свинцевание и покрытие сплавами;

химические покрытия: никелирование, хромирование, покрытие кобальтом и сплавами никель — кобальт;

способы придания поверхности антифрикционных свойств: графитирование, накатывание (углубления, канавки), нанесение покрытий в вакууме, нанесение дисульфида молибдена, фрикционное латунирование и бронзирование — ФАБО (финишная антифрикционная безабразивная обработка), покрытие пластмассами (вихревой и газопламенный методы), металлизация напылением;

наплавка: электродуговая, электрошлаковая, вибродуговая;

нанесение износостойких покрытий методом конденсации в вакууме с ионной бомбардировкой (метод КИБ);

нанесение твердосмазочных покрытий на основе молибдена методом магнетронного напыления для узлов сухого трения;

Наиболее крупная технологическая школа в России создана Э.А. Сателем в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эта школа подготовила многочисленные научные кадры и явилась центром технологической науки.

6.4. Эксплуатационные мероприятия по повышению долговечности машин

Конструктивное совершенство и высокое качество изготовления машин не гарантируют их длительную и безаварийную работу. Дополнительными условиями такой работы являются грамотная техническая эксплуатация и целесообразная система ремонтов. Задачами технической эксплуатации являются: обеспечение исправного технического состояния машины во время ее эксплуатации и консервации; обеспечение безаварийной работы машины при надлежащей ее экономичности. Уровень технической эксплуатации машин в общем определяется установкой их в надлежащем месте, рациональным использованием в соответствии с назначением, квалификацией обслуживающего персонала, постановкой ухода за машинами и технического надзора за ними, организацией смазочного хозяйства.

Накоплен большой опыт по эксплуатации машин применительно к отдельным отраслям техники, имеются фундаментальные монографии по эксплуатации машинно-тракторного парка, авиационной техники, техники морского флота и др. К сожалению, еще недостаточно обобщены вопросы связи эксплуатации машин с их износостойкостью. Небольшой опыт по этому вопросу изложен в монографии [37].

7. Организация борьбы с трением и изнашиванием в машинах в России

В России еще нет межотраслевого научного учреждения, которое отвечало бы за развитие работ по приботехнике в целом, как это, например, организовано по вопросам борьбы с коррозией металлов. При РАН, Минпромнауки России и Союзе НИО имеется межведомственный научный совет по трибологии, который координирует исследования и объединяет усилия различных специалистов, как в создании научной теории трения и изнашивания, так и в части разработки прикладных вопросов триботехники.

Работы в области триботехники ведутся в высших учебных заведениях: Российском государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина, Ростовском государственном университете инженеров железнодорожного транспорта, Саратовском государственном техническом университете, Московском государственном агроинженерном университете им В.П. Горячкина, Донском государственном техническом университете, Московском государственном университете сервиса, Омском государственном университете и др.

В СНТО имеется Комитет по проблемам износостойкости и трения, который призван проводить широкую работу по внедрению в промышленность новых методов повышения износостойкости, вести пропаганду научных знаний по триботехнике и международное сотрудничество по этим вопросам.

В Академии проблем качества РФ имеется отделение “Проблем безызносности машин и механизмов”. Отделение издает Международный журнал “Эффект безызносности и триботехнологии”.

8. Инженерно-технические проблемы триботехники

Остановимся на следующих важных инженерно-технических проблемах триботехники, которые, по нашему мнению, являются наиболее актуальными:

— экономика и триботехника;

— создание “безызносных” узлов трения машин;

— разработка методов расчета деталей на износ;

— защита деталей машин от водородного изнашивания;

— расширение применения финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) трущихся деталей;

— совершенствование смазывания деталей сочленений;

— исследование электрических, магнитных и вибрационных явлений при изнашивании;

— подготовка инженерных кадров по триботехнике;

— разработка новой теории трения и безызносности;

— триботехника, интересы здоровья и защиты окружающей среды;

— программа исследований водородного изнашивания и избирательного переноса.

Часть проблем триботехники изложена в работах [4, 8, 10, 11].

8.1. Экономика и триботехника

Конечные результаты исследований и разработок по триботехнике должны обеспечивать снижение затрат труда на техническое обслуживание и текущий ремонт машин, снижение стоимости капитальных ремонтов, уменьшение расходов запасных частей, экономию горючесмазочных материалов, снижение металлоемкости конструкций узлов трения и повышение производительности машины. В целом триботехника должна решать узловые проблемы экономики, относящиеся к сырьевым, энергетическим и трудовым ресурсам страны.

Эти важные задачи потребуют в ряде случаев пересмотра планов научно-исследовательских работ, решения теоретических вопросов трения, изнашивания и смазки машин. В настоящее время предложено огромное количество различных материалов для узлов трения, конструкций узлов машин, технологических методов обработки поверхностей трения. Многие из них не оправдывают своего назначения.

Ряд прогрессивных методов повышения ресурса деталей, эффективных смазочных материалов, покрытий и т.п., подробно описанных в литературе и проверенных на отдельных предприятиях, не может получить массового применения в промышленности. На их пути встает стремление сохранить традиционную технологию и предельно низкую себестоимость продукции, игнорируя то обстоятельство, что экономия на заводе часто приводит к потерям при эксплуатации и ремонте выпускаемых изделий.

Разработка научных программ по проблемам износостойкости диктуется экономической значимостью этой проблемы для народного хозяйства. Следует еще раз подчеркнуть, что износ является главной причиной снятия машин и оборудования с эксплуатации для производства ремонта, и потери от этого могут быть сокращены рациональным применением способов, основанных на триботехнике. Управление процессом изнашивания является центральным звеном таких национальных проблем, как экономия энергии, сокращение расхода материалов, а также надежность и безопасность механических систем. Ознакомимся с некоторыми проблемами более подробно.

Проблема износостойкости и использования ресурсов. Вопросы износа машин и оборудования тесно связаны с сохранением или экономией естественных ресурсов, жизненно важных для поддержания современного и будущего экономического роста [4]. Потери материалов возникают на всех стадиях (например, добычи, извлечения и очистки руды, изготовления и ремонта изделий, а также когда изделие выбрасывается из-за морального износа или непригодности). При этом теряются затраченные денежные средства, энергия и труд. Избежать этих потерь невозможно, приходится руководствоваться их минимизацией. Значительная экономия может быть достигнута сокращением потерь на тех стадиях, где они особенно велики.

Заслуживают особого внимания две стадии: производство оборудования и машин; эксплуатация. Примерно 18,5 % получаемой потребителями стали (по данным США) превращается в отходы в процессе изго-

товления изделий. При эксплуатации потери намного выше. Разработка систем с повышенной износостойкостью сокращает эти потери двумя путями: уменьшение числа потребных запасных частей и повышение общего срока службы машин и оборудования.

О том, сколько требуется запасных частей в эксплуатации, проанализируем на примере двух деталей из десятков тысяч наименований. Автомобильный завод, выпустивший 100 ЗИЛов-130, должен затем ежегодно изготавливать к ним 150 крестовин карданов и 15 карданных валов. А заводу, выпустившему 100 тракторов К-700, необходимо ежегодно изготавливать 400 крестовин карданов и 50 карданных валов. Здесь необходимо сообщить один интересный факт. Автомобили и тракторы на Севере требуют запасных частей в 2 раза, а в зонах с повышенной влажностью — в 1,5 раза больше, чем в средней полосе. Указанные районы значительно отдалены от места производства запасных деталей.

С. Злотник, анализируя вопросы влияния износа на экономию топлива, рассматривает три группы факторов: изготовление продукции для замены изношенной; затраты на обслуживание и ремонт; противоречия между требованиями к КПД и износом. Потребление энергии на замену изношенной продукции в общем балансе потребления энергии не столь велико, однако имеет значение. Так, если только 5% промышленного выпуска идет на замену изношенной продукции и если исследования и разработки в области триботехники позволяют сократить эти потери на 10%, то, например, для США экономия составит 300 млн долларов, что эквивалентно ежегодному сбережению 715 тыс. т нефти, 142 млн кубических метров газа, 0,8 млн т угля и 4,5 млрд кВт. · ч электроэнергии. Естественно, при большей возможности снижения износа возрастает и экономия топлива.

Иллюстрируя второй фактор, можно указать, что расходы на обслуживание и ремонт самолетов, автомобилей и железнодорожного подвижного состава в США составляют 47 млрд долларов в год. Если принять, что расходы на топливо составляют 10% (по данным США, 10% валового национального продукта приходится на долю электроэнергии), а экономия от достижений триботехники составляет 10%, то суммарный выигрыш будет равен 470 млн долларов.

Третий фактор относится к разработке новых машин. Известно, что КПД повышается с ростом максимальной рабочей температуры двигателя внутреннего сгорания. Этот максимум ограничивается износом его деталей. Уменьшение габаритов машины приводит к повышению нагрузок на ее подвижные части. Однако на это имеются ограничения, связанные с определенным пределом интенсивности изнашивания за время службы системы.

Повышение скоростных характеристик позволяет снизить габариты машины, но повышение скорости приводит к повышению температур, что снижает износостойкость деталей.

Ввиду большого потребления топлива легковыми и грузовыми автомобилями повышение КПД автомобильного транспорта особенно привлекательно. Например, в США в 1973 г. потребляемая этим транспортом

энергия была эквивалентна сжиганию 858 тыс. т нефти в день и стоила 30 млрд долларов. Повышение КПД на 30% вследствие исследований и разработок триботехники, что по мнению ученых вполне допустимо, позволит вдвое снизить расход топлива. Имеется в виду создание адиабатического двигателя, в котором изолируются цилиндры и используется энергия отработавших газов для привода турбины, механически связанной с приводным валом. Проблема состоит в том, что повышение температуры приведет к повышенному износу. Однако применение жаропрочных материалов, главным образом керамики, позволяет снизить интенсивность изнашивания по сравнению с имеющейся в обычных двигателях.

Повышение КПД двигателей на 7...8% возможно путем снижения коэффициента трения между поршневыми кольцами и цилиндрами, шейками коленчатых валов и подшипниками. В России разработаны технологические процессы, которые позволяют снизить коэффициент трения указанных пар в 2 раза. Это хромирование цилиндров двигателей с накаткой, применение ФАБО и использование металлоплакирующих присадок к маслам, реализующих ИП. Все методы широко освещены в технической литературе.

Нельзя не упомянуть вопрос об уплотнениях. В основном уплотнения служат для изоляции узлов трения от окружающей среды. Во многих случаях их качество неудовлетворительно, особенно в ряде узлов автомобилей и сельскохозяйственных машин. Изоляция от песка и воды еще представляет большую проблему при конструировании узлов трения многих машин и оборудования.

Проблема износостойкости и людских ресурсов. В связи с увеличением количества действующих машин и оборудования за последние годы во всех развитых странах возникла проблема специалистов для обслуживания и ремонта. Рост потока машин всюду опережает увеличение числа опытных механиков. Для подготовки механиков высокой квалификации необходимо несколько лет обучения и накопления опыта.

С каждым годом растет объем перевозок грузов автомобилями. По перевозке грузов (в тоннах) в России на автомобильный парк приходится около 70%, а на железнодорожный транспорт 30%. Однако стоимость перевозок автотранспортом в 12 раз дороже, чем по железной дороге. Очень велики затраты на обслуживание автомобилей и их ремонт. Здесь вопросы триботехники являются главными в снижении этих видов затрат. Выход из строя деталей, разрегулировка, производство смазочных работ, контроль технического состояния узлов трения – все это требует привлечения к работе опытных высококвалифицированных специалистов. И здесь вопросы триботехники являются главным фактором в сокращении потребности в людских ресурсах.

Смазочные и регулировочные работы занимают около 50% времени на техническое обслуживание автомобилей, 60% текстильного оборудования и до 40% самолетов. Применение металлоплакирующих смазочных материалов позволяет в 3 раза сократить такие затраты. Это один из примеров влияния триботехники на снижение затрат на техническое обслуживание машин и оборудования.

8.2. Создания безызносных узлов трения машин

До последнего времени генеральным направлением по борьбе с изнашиванием в машиностроении было повышение твердости трущихся поверхностей деталей. В промышленности разработано большое количество методов повышения твердости деталей: цементирование, азотирование, хромирование, цианирование, поверхностная закалка, наплавка твердыми материалами и др. Многолетний опыт свидетельствует, что это направление позволило в большей степени повысить надежность трущихся деталей машин. Например, электролитическое хромирование цилиндров двигателей внутреннего сгорания не только повышает износостойкость пары цилиндр — поршневое кольцо, но и в большей степени снижает потери на трение в цилиндропоршневой группе двигателей. Без азотирования или цементирования зубчатых передач в настоящее время нельзя обеспечить надежную работу тяжелонагруженных редукторов. Разработанные методы повышения твердости трущихся деталей явились мощным орудием в деле увеличения износостойкости деталей, а следовательно, и увеличения срока службы машин.

Однако постоянное стремление к уменьшению массы машин и повышению интенсификации рабочих процессов привело к увеличению давлений в узлах машин и скоростей скольжения и ухудшило условия смазывания. Кроме того, требования к повышению КПД механизмов, а также применение специальных смазочных материалов и жидкостей привело к тому, что традиционные методы увеличения износостойкости деталей повышением их твердости во многих случаях перестали себя оправдывать. Площадь фактического контакта поверхностей деталей при высокой твердости материала в силу ряда причин (наличие возможного перекоса, большой шероховатости и волнистости поверхности) составляет очень малую долю номинальной поверхности трения. В результате на участках фактического контакта создаются громадные давления, что приводит к интенсивному изнашиванию поверхностей трения.

В процессе поиска средств увеличения износостойкости деталей машин в нашей стране открыт избирательный перенос при трении. Избирательный перенос (ИП) — это комплекс физико-химических явлений на контакте поверхностей при трении, который позволяет преодолеть ограниченность ресурса трущихся сочленений машин и снизить потери на трение. В ИП используются фундаментальные физико-химические процессы в отличие от трения при граничной смазке, где основой является механическое взаимодействие, и, например, такое могучее средство снижения износа и трения, как эффект Ребиндера, почти не используется.

ИП, его системы снижения износа и трения (системы СИТ), разработанные А. А. Поляковым, не вытекают из ранее имевшихся представлений о трении и изнашивании. Сложность ИП обусловливается как совокупностью различных химических и физико-химических процессов, так и системой взаимодействия этих процессов, носящих кибернетический характер. В связи с этим уместно сослаться на общую теорию систем, где указывается, что традиционное разделение науки на классические дис-

циплины не удовлетворяет потребности современного научного познания, а сложные системы любого вида не поддаются адекватному описанию в рамках одной научной дисциплины. Как это будет показано во второй части книги процессы, составляющие сущность ИП, находятся, как правило, на стыках разделов химии, физической химии, физики, синергетики и механики.

Сложность ИП состоит также в том, что ряд его химических и физических процессов не встречался в практике исследований трения. К ним следует отнести процессы, происходящие при трении в сервовитной пленке, когда накопление дислокаций при ее деформировании поддерживается на некотором низком уровне, тем самым обеспечивая безызносность контактирующих поверхностей. К таким явлениям следует также отнести обратную связь между нагрузкой и силой трения, когда в определенном диапазоне нагрузок и скоростей скольжения их увеличение вызывает уменьшение силы трения. Большинство химических реакций ИП являются гетерогенными, поэтому их изучение затруднено.

Сервовитная пленка — защитная металлическая пленка, возникающая в начальной стадии трения в результате избирательного растворения анодных компонентов поверхностного слоя материала.

Электрические явления сопровождают все виды внешнего трения, так как процесс образования адгезионной связи между соприкасающимися поверхностями разнородных твердых тел приводит к образованию в контакте двойного электрического слоя. В ИП электрические явления играют определенную роль. В начальной стадии ИП имеет место избирательное (электрохимическое) растворение в результате работы микроэлементов медного сплава, ускоренного механодинамическим действием трения. В результате на поверхности образуется слой меди — сервовитная пленка, которая пассивирует поверхность медного сплава. Начинает одновременно работать элемент медь — медь. На поверхностях трения возникают два одноименно заряженных слоя. Это обстоятельство имеет кардинальное следствие — возникает кулоново отталкивание этих слоев, снижающее адгезионное взаимодействие. Вступает в работу третий элемент, его действие заключается во втягивании в зазор положительно заряженных частиц. Напряженность поля и возникающая ЭДС могут достигнуть десятков миллионов вольт на 1 см, и в зазор будут втягиваться не только золи, но и частицы коллоидных размеров, т. е. возникает электрофорез [31].

ИП имеет в своей основе описанные выше и другие полезные физико-химические явления и группы явлений (систем). Они подавляют изнашивание, снижают сопротивление сдвигу и обладают свойством самоорганизации, а иногда и способностью к обратной связи с возбуждающей причиной. Их основная ценность состоит в том, что они работают дифференцированно против факторов, ведущих к разрушению поверхности. Почти каждая из систем имеет глубокое содержание; например, система защиты от водородного изнашивания представляет собой целое трибологическое направление, а диффузионно-вакансионный механизм сниже-

ния сопротивления сдвигу представляет собой новую физическую проблему трения, обусловливающую безызносность [6, 7].

Традиционной системой снижения износа и трения (СИТ) является самопроизвольное образование слоя смазочного материала при трении с граничной смазкой в результате адсорбции молекул смазочного материала на поверхности. Имеются и другие данные использования физико-химических явлений для защиты от изнашивания и для снижения трения, Однако в ИП имеется максимальное число систем СИТ, и эффект здесь наиболее полный и существенный.

Явление ИП обусловлено термодинамическими системами трения. Свойства этих систем раскрыты И. Р. Пригожиным, который установил возможность высокой самоорганизации физических и химических систем при определенных термодинамических условиях. Трение является термодинамически неравновесным процессом, который может существовать как в области, близкой к равновесию, так и вдали от нее, образуя различные структурные классы, переход к которым осуществляется скачкообразно. В связи с этим возможно существование систем трения, не накапливающих энергии в виде скоплений дефектов в поверхностных слоях, а полностью передающих энергию во внешнюю среду. Примером такой системы является ИП [7, 8].

Весьма полезным является свойство ИП работать в средах, где трение при граничной смазке не может эффективно выполнять свои функции. ИП проявляет способность перестройки защитных систем, которые варьируются в зависимости от свойств среды, являющейся исходным материалом для образования системы снижения износа и трения.

Для осуществления ИП в парах трения сталь — сталь, чугун — сталь и др., не содержащих пленкообразующего материала, используют *металлоплакирующие смазочные материалы*. Они содержат порошок пленкообразующего материала или окись металла, восстанавливаемого при трении, или металлорганическое соединение, выделяющее металл при разложении в зоне трения. При этом поверхностно-активные вещества должны содержаться в базовом смазочном материале или образовываться при распаде металлорганического соединения.

Металлоплакирующие пластичные смазочные материалы (например, на основе ЦИАТИМ-201), содержащие порошок бронзы или латуни, применяют в тяжелонагруженных узлах трения типа винт — гайка и др., где обычные смазочные материалы малоэффективны. Весьма перспективными являются жидкие металлоплакирующие смазочные материалы с добавками металлорганических или комплексных соединений, работающие как в режиме ИП, так и в режиме граничной смазки.

В тех случаях, когда смазочным материалом является среда, не содержащая поверхностно-активных веществ (например, вода, водные растворы серной кислоты, солей), металлоплакирующая смазка переходит в ионную.

Ионная смазка основана на свойстве ионов металла, находящихся в растворе, втягиваться в зазор между поверхностями трения и разряжаться в зоне контакта, образуя разделительную (дивидальную) пленку.

Износостойкость контактирующих в соляных и других агрессивных растворах поверхностей существенно возрастает, если в контакт ввести продукты деструкции пластмассы с помощью подпружиненных вставок или других конструктивных мероприятий. Такие вставки существенно увеличивают срок службы поверхностей трения в морской воде. Продукты деструкции твердой пластмассы ведут себя в контакте аналогично продуктам деструкции жидких углеводородов, т. е. вызывают окислительно-восстановительный процесс и образуют поверхностно-активные вещества, что существенно снижает интенсивность изнашивания.

Исследование механизма ИП, его закономерностей и областей рационального применения привело к некоторому изменению установившихся ранее взглядов на ряд вопросов триботехники: структуру и свойства тонких поверхностных слоев трущихся деталей машин, механизм изнашивания и смазочного действия, пути создания смазочных материалов и присадок к ним, оптимальную структуру и свойства износостойких и антифрикционных материалов и приработочных покрытий и др.

Приводим сводные данные по техническим характеристикам ИП, его использованию и эффективности, обобщенные по литературным источникам.

На основании рассмотренного можно считать, что избирательный перенос — особый вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта неокисляющейся тонкой металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу и неспособной наклепываться. На пленке образуется в свою очередь полимерная пленка, которая создает дополнительный антифрикционный слой.

ИП применен или апробирован в машинах: самолетах (узлы трения шасси, планера), автомобилях (передняя подвеска), станках (направляющие, пара винт — гайка), паровых машинах (цилиндр — поршневое кольцо), дизелях тепловозов (цилиндр — поршневое кольцо), прессовом оборудовании (подшипники скольжения), редукторах (пара червяк — колесо), оборудовании химической промышленности (подшипники, уплотнения), механизмах морских судов (подшипники), магистральных нефтепроводах (уплотнения), электробурах (уплотнения), холодильниках (трущиеся детали компрессора), гидронасосах (узлы трения), нефтепромысловом оборудовании (узлы трения). ИП применяется также в приборах (электрические контакты) и может быть использован для повышения стойкости режущего инструмента при сверлении, фрезеровании, протягивании, дорновании и разьбонарезании.

Факторы, обусловливающие безызносность, следующие:

контактирование поверхностей происходит через мягкий слой металла, основной металл испытывает пониженное (в 10 раз) давление;

металлическая пленка при деформации в процессе трения не наклепывается и может многократно деформироваться без разрушения;

трение происходит без окисления поверхностей, эффект Ребиндера реализуется в большей степени;

продукты износа переходят с одной трущейся поверхности на другую и обратно, в зоне трения продукты износа удерживаются электрическими силами.

ИП позволяет: 1) при изготовлении машин экономить металл (15... 20%) за счет большей грузоподъемности (в 1,5...2 раза) пар трения; 2) увеличить срок работы машин (в 2 раза), сократить период приработки двигателей (в 3 раза) и редукторов (до 10 раз), соответственно сократить расход электроэнергии; 3) в подшипниках скольжения и качения уменьшить расход смазочных материалов (до 2 раз); 4) повысить КПД глобоидных редукторов с 0,7 до 0,85; винтовой пары с 0,25 до 0,5; 5) увеличить экономию драгоценных металлов (золота, платины, серебра) в приборах в 2...3 раза за счет большей надежности электрических контактов.

Дальнейшее развитие работ по созданию практически неизнашиваемых узлов трения машин, оборудования и приборов с использованием ИП — одна из важнейших проблем современной триботехники.

8.3. Разработка методов расчета деталей на износ

Наибольшее внимание при разработке методов расчета деталей на износ необходимо уделить методам расчета типовых наиболее изнашиваемых узлов машин: направляющих металлорежущих станков, зубчатых передач, подшипников скольжения и качения, кулачковых механизмов, фрикционных передач, уплотнений валов. По вопросам расчета указанных сочленений имеются фундаментальные разработки, которые подробно описаны в технической литературе и широко используются на практике.

Во многих случаях для расчета типовых узлов, например направляющих станков, целесообразно использовать простую формулу износа, предложенную А.С. Прониковым [32]: $И = Kp^m v^n t$, где И – величина износа; K – коэффициент; p – давление; v — скорость скольжения; t — время работы сочленения.

Коэффициент K определяют на основании моделирования процесса изнашивания материалов пар трения с учетом условий эксплуатации, проведения необходимых экспериментов на изнашивание и обработки полученных результатов на ЭВМ. Такая методика расчета на износ использована для направляющих металлорежущих станков. Очевидно, этот метод будет распространен с определенными коррективами и на другие сочленения.

Другим перспективным методом расчета деталей на износ является метод, развиваемый Ю.Н. Дроздовым. Он сводится к определению условий отсутствия заедания и повышенного износа. Расчетные зависимости представляют в критериальном виде через комплексы, характеризующие реологические процессы, диссипацию энергии, диффузионные процессы, физико-механические характеристики материалов пар трения. Расчет сочетается с использованием результатов, полученных экспериментально, с данными исследования динамики процесса заедания.

Главной трудностью на пути подобных расчетов является то, что в процессе трения происходят физико-химические изменения в поверхностных слоях трущихся материалов, которые трудно поддаются математическому анализу.

8.4. Защита деталей машин от водородного изнашивания

Важной задачей триботехники является разработка методов борьбы с водородным изнашиванием. Несколько лет назад в Советском Союзе экспериментально обнаружено неизвестное ранее явление концентрации в поверхностных слоях трущихся деталей водорода, выделяющегося из материалов пары трения и из окружающей среды (смазочного материала, топлива, воды и др.). Это явление вызывает ускорение изнашивания [18].

Водородное изнашивание характеризуется рядом процессов в узлах трения машин:

интенсивным выделением водорода в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, ускоряемым механохимическим действием;

диффузией водорода в деформируемый слой стали; скорость диффузии определяется градиентами температур и напряжений, что создает эффект накапливания водорода в процессе трения;

особым видом разрушения, связанным с одновременным появлением большого числа "зародышей" трещин по всей зоне деформирования, и упомянутым эффектом накапливания водорода.

Водородное изнашивание не имеет общих черт с водородной хрупкостью стали ни по источникам наворoдороживания, ни по интенсивности и характеру распределения водорода в стали, ни по характеру разрушения, поскольку он связан только с процессом трения и обусловлен им. Для водородного изнашивания характерны высокая локальная концентрация водорода в поверхностном слое стали, возникающая вследствие больших градиентов температуры и напряжений при трении, которые обусловливают явление накапливания и особый характер роста трещин, приводящий к сплошному разрушению слоя. Водородное изнашивание вносит новые представления о механизме хрупкого разрушения.

Защита от водородного изнашивания имеет особое значение для следующих отраслей:

авиационной техники (узлы трения топливных насосов, а также тормозные колодки и барабаны колес выходят из строя в результате водородного изнашивания);

железнодорожного транспорта (повышение скоростей поездов связано с созданием более эффективных тормозов); попытка использования пластмассовых тормозных колодок желаемых результатов не дала вследствие усиленного водородного изнашивания бандажей колес; водородному изнашиванию подвергаются рельсы и колеса вагонов;

автомобильного транспорта (водородное изнашивание резко снижает срок службы цилиндров и поршневых колес двигателей, тормозных

накладок, тормозных барабанов и дисков сцепления, а также лопаток бензиновых насосов и других деталей агрегатов автомобилей);

морского флота (водородному изнашиванию подвергаются узлы трения, смазываемые водой, например, подшипники гребных валов судов и др.);

деревообрабатывающей промышленности (водородное изнашивание деревообрабатывающего инструмента и рабочих органов машин сдерживает рост производительности труда в отрасли);

техники Севера (одной из причин быстрого изнашивания машин, работающих на Севере, является охрупчивающее действие водорода, который при низких температурах не рассасывается в поверхностных слоях, а концентрируется между зоной трения и объемом материала трущейся детали вследствие значительного перепада температур);

химического машиностроения (узлы трения машин и оборудования химической промышленности изнашиваются главным образом в результате действия водорода);

техники будущего (в новых машинах расширяется применение титана и его сплавов; при трении эти материалы, обладая низкими антифрикционными свойствами, весьма сильно поглощают водород и подвергаются водородному изнашиванию).

При ведущейся в России и США широкой работе по созданию двигателей для автомобилей и самолетов на водородном топливе исследователи должны заранее принять меры защиты деталей от водородного изнашивания.

Проблема водородного изнашивания имеет комплексный межотраслевой характер, и поэтому требует привлечения к ее решению ученых различных специальностей (металловедов, физиков, химиков, специалистов по триботехнике), и должна выполняться по единому плану.

8.5. Расширение и применение финишной антифрикционной безабразивной обработки трущихся деталей (ФАБО)

Как известно, износостойкость зависит от окончательной (финишной) технологической обработки поверхностей деталей. Имеются обширные экспериментальные исследования по влиянию шероховатости поверхностей трения на интенсивность изнашивания деталей. Для широко распространенных сочленений выявлены оптимальные значения параметра шероховатости, при которых износ деталей минимален. Установлено, что от финишной обработки деталей зависит не только первоначальный (приработочный) износ, но и установившийся износ, т. е. первоначальная приработка может влиять на интенсивность изнашивания при длительной эксплуатации машин.

В последние годы разработаны новые технологические процессы финишной обработки деталей, которые позволяют снизить приработочный износ деталей и повысить антифрикционные свойства сочленения (улучшить смазку деталей, снизить коэффициент трения). К таким мето-

мые ФАБО, могут быть шлифованы, развернуты, проточены или хонингованы. Шероховатость поверхности должна быть в пределах Ra = 2,5... 1,25 мкм.

Преимущество ФАБО перед другими финишными операциями состоит в том, что этот метод чрезвычайно прост и не требует сложного оборудования. ФАБО придает стальной или чугунной поверхности высокие антифрикционные свойства. После ФАБО цилиндр двигателя внутреннего сгорания как бы превращается на первый период работы в бронзовый, коэффициент трения между поршневым кольцом и зеркалом цилиндра уменьшается в 2 раза. Это может существенно отразиться на мощности двигателя.

Опыт использования ФАБО для цилиндров двигателя показал большое преимущество этого метода по сравнению только с одним хонингованием. Износостойкость цилиндров и поршневых колец возросла в 1,4 раза.

Шейки коленчатых валов также целесообразно подвергать ФАБО, поскольку они и сопрягаемые с ними вкладыши лимитируют время приработки двигателей и часто подвергаются ремонтам. В этом направлении предстоят исследовательские работы.

Опыт применения ФАБО колес железнодорожного транспорта свидетельствует о целесообразности его применения в более широких масштабах.

8.6. Совершенствование смазывания деталей сочленений

Смазка резко снижает интенсивность изнашивания. Достаточно ввести в зону контакта деталей небольшое количество смазочного материала (толщина смазочного слоя 0,1 мкм), как сила трения может снизиться в 10 раз, а износ поверхностей трения до 1000 раз [37].

Современные машины и оборудование содержат большое число узлов трения (от десятков до тысяч), которые испытывают высокие давления, температуры и скорости скольжения. В России и за рубежом разработаны специальные смазочные системы, которые автоматически, через строго определенный промежуток времени, подают в зону трения заданное количество смазочного материала. В настоящее время уровень технического совершенства машин во многом определяется степенью организации смазывания узлов трения [1].

Эффективность смазочной системы зависит от ее конструктивного совершенства и качества смазочного материала [1]. Пока нет четких рекомендаций по дозировке и длительности подачи смазочных материалов в конкретные узлы трения машины. При переводе трущихся деталей машин в режим ИП необходимо создавать принципиально новые смазочные системы, которые бы обеспечили автоматическое регулирование параметров работы системы в зависимости от режима работы машины, т. е. необходимо разрабатывать адаптированные смазочные системы, предупреждающие износ трущихся деталей машин и снижающие потери на трение.

Более всего нуждается в смазочных системах станкостроительная, автомобильная и тяжелая промышленность.

Увеличение выпуска смазочных систем должно сопровождаться повышением их эффективности, что требует проведения научно-исследовательских разработок по конструктивному и технологическому совершенствованию производства основных узлов систем, создания поточных линий, улучшения планирования и использования экономических стимулов повышения производительности труда.

При этом большое внимание следует уделять использованию современных достижений триботехники. Смазочные системы должны обеспечивать режим ИП в узлах трения в такой степени, чтобы последние за весь период работы машины не выходили из полей допусков размера деталей узлов и потребляли минимум энергии на преодоление трения.

Смазочные системы должны использоваться в ряде машин. Среди них металлорежущие станки и кузнечно-прессовые машины, крупные приводные компрессоры, текстильные машины и станки, башенные краны и лифты, экскаваторы, бульдозеры, автогрейдеры, тракторы, магистральные локомотивы, грузовые автомобили и автобусы, комбайны и другие сельскохозяйственные машины. По экспертной оценке специалистов (проектантов машин, разработчиков смазочного оборудования, эксплуатационников) оснащению смазочными системами и многоотводными насосами, обеспечивающими точность и своевременность подачи смазочных материалов, подлежит до 85% перечисленных выше машин и оборудования (около 2,5 млн единиц).

Для значительного повышения технического уровня и качества машин, их экономичности и надежности необходимо решить проблему смазывания. Это может быть обеспечено за счет:

— повышения технического уровня и качества смазочного оборудования, его унификации и стандартизации; совершенствования и повышения эффективности эксплуатации смазочного оборудования;

— создания новых высокоэффективных смазочных материалов, например металлоплакирующих, реализующих ИП;

— конструктивного совершенства узлов трения машин;

— разработки и применения новых эффективных технологических процессов обработки трущихся деталей, например ФАБО деталей;

— разработки методов безразборного восстановления трущихся сочленений машин и механизмов и др.

В зарубежных странах на выпуске смазочного оборудования специализируются многие фирмы. В наиболее полной номенклатуре смазочное оборудование выпускают фирмы "Фогель" (Германия) и "Трабон" (США); их смазочные системы пользуются наибольшим спросом у потребителей.

Повышение технического уровня смазочного оборудования целесообразно проводить по следующим основным направлениям:

— создание комплектного оборудования по принципу системы машин;

— расширение номенклатуры смазочных систем для различных видов стационарных и мобильных машин, а также различных производственных и климатических условий;

— создание автоматических систем, адаптирующихся к режимам работы основных узлов трения машин;

— уменьшение габаритов и металлоемкости узлов и аппаратов смазочных систем;

— повышение точности и стабильности подачи смазочного материала;

— совершенствование специализации и кооперирования производства;

— перевод смазочных систем на использование смазочных материалов, обеспечивающих режим ИП, чтобы исключить ремонт узлов трения машин по причине износа [1].

Проблему смазывания деталей нельзя отделить от изучения взаимодействия смазочного материала с металлом и влияние на это взаимодействие структурных факторов металла и легирующих элементов смазочного материала. Исследование такого взаимодействия с определением сил трения и износостойкости пар трения позволит оптимизировать структуру и химический состав металла и состав компонентов смазочного материала [35].

Это научное направление, успешно развиваемое в последние годы и потребовавшее разработки новых физических методов исследования тонких поверхностных слоев металла (десятые доли микрометра), должно получить дальнейшее развитие в организациях как занимающихся созданием смазочных материалов, так и разрабатывающих износостойкие и антифрикционные сплавы. Результаты исследований будут положены в основу теории безызносности трущихся деталей.

Первые работы в этом направлении показали, что многие антифрикционные бронзы, применяемые в гидравлических системах, по составу компонентов не обеспечивают необходимой долговечности узлов трения перекачивающих насосов.

8.7. Исследование электрических, магнитных и вибрационных явлений при изнашивании

В литературе по триботехнике за последние 30—50 лет неоднократно обращалось внимание на роль электрических, магнитных и вибрационных процессов в трении, износе и смазке машин. По этому вопросу известны работы А.Д. Дубинина [14], В.А. Бобровского, В.Н. Постникова [31], Г.А. Прейса [23], С.А. Лапшина и др. Одновременно публиковались результаты исследований, которые свидетельствовали, что роль электрических явлений, например при изнашивании режущего инструмента, очень мала, и они практически не могут быть использованы для повышения износостойкости режущего инструмента. Этим явлениям противопоставляются такие мощные факторы, влияющие на износ, как пластические деформации, окисление поверхности, тепловые явления, которые якобы сводят на нет роль электричества.

Однако последние исследования процесса водородного изнашивания, выполненные В.И. Колесниковым [21], Г.И. Сурановым, Э.А. Станчуком

и др., показали, что здесь кроются большие резервы в части повышения срока службы деталей машин и режущего инструмента. Электрические, магнитные, вибрационные, а также тепловые явления непосредственно не влияют на интенсивность изнашивания деталей или влияют незначительно, но они кардинально влияют на поведение водорода. Разрушительной силой в данном случае является именно водород, а не электрическое или магнитное поле. Это связано с тем, что водород имеет электрический заряд, который взаимодействует с указанными полями.

Здесь уместно привести философское высказывание Ф. Энгельса об электричестве: "Как теплота, только в другом роде, электричество некоторым образом вездесуще. На земле не происходит почти ни одного изменения, не сопровождаемого какими- нибудь электрическими явлениями" (Энгельс Ф. Диалектика природы. М: Изд-во политической литературы, 1965, с. 92).

Как отмечалось ранее, вибрации с высокими частотами также воздействуют на скорость изнашивания не сами по себе, а посредством электрических явлений, которые, в свою очередь, влияют на движение водорода и способствуют его образованию.

Тепловые явления, как и напряжения, влияя самостоятельно на трение и износ, являются процессами образования водорода и способствуют продвижению его в зону контакта. Все изложенное требует глубокой и всесторонней проработки как в теоретическом плане, так и при проведении экспериментальных исследований.

Исследование электрических и магнитных явлений при трении – это один из наиболее достоверных и эффективных путей изучения самой природы трения и изнашивания. Напомним, что именно трение позволило человеку открыть огонь и теплоту, электрон и электричество, создать первые электрические машины, получить один из самых сильных методов ускорения химических реакций и многое другое. Трение обусловлено не только внешним воздействием, но и внутренними силами природы, главным образом электрическими и магнитными силами.

Как показали исследования Т.М. Балабекова, при трении между контактирующими телами возникают предельно большие электрические поля и электроэмиссионные явления (электроэмиссионные явления при трении подробно изучены В.Д. Евдокимовым [15]). Вследствие этих явлений могут возникнуть процессы разрушения молекул, в частности воды, и образования кислорода и водорода, а отсюда все последствия водородного изнашивания.

Анализ литературных данных Б.В. Дерягина, Н.А. Кротовой и В.П. Смигла свидетельствует о преобладающей роли в адгезионном взаимодействии при трении диэлектрических материалов контактной электризации и электрического притяжения двойного электрического поля, возникающего на границе двух фаз.

Для управления процессом трения следует провести исследования по раздельному изучению электрических, термоэлектрических и магнитных явлений, установить роль каждого в зависимости от внешних условий трения и видов разрушения поверхностного слоя.

Особенно следует обратить внимание на выявление нелинейности распределения зарядов в подвижном электрическом источнике зоны фрикционного контакта. Именно в нелинейности кроются многие до сего времени еще неизвестные процессы трения и изнашивания, определяющие кинетику и интенсивность этих физико-химических процессов [46].

8.8. Подготовка инженерных кадров по триботехнике

Для успешного развития любой науки нужны научные и инженерно-технические кадры. Необходимо организовать подготовку специалистов по триботехнике в высших и средних учебных заведениях машиностроительного профиля, а также в институтах повышения квалификации в отраслях промышленности. Отсутствие знаний по триботехнике порой приводит к тому, что некоторые инженеры, даже имеющие опыт ремонта машин, а порой и научные работники смежных специальностей, не зная существа предмета, истории его развития и не имея опыта проведения научно-исследовательских работ, берутся решать важные вопросы триботехники.

Уместно в связи с этим привести слова Гамлета из известной трагедии Шекспира. Когда к принцу подсылают Розенкранца и Гильденстерна с указанием выведать, что у него на уме, он, поняв их намерения, внезапно предлагает одному из них, показывая на флейту, сыграть что-нибудь на этом инструменте. Получив ответ, что этому собеседник не обучен, Гамлет, деланно изумляясь, восклицает: "Вы не можете без подготовки справиться с этим простым устройством, а решили разобраться во мне, не зная обо мне в сущности ничего".

Автор данной книги более 20 лет работал над анализом предпосылок и причин аварий самолетов, связанных с недостаточной надежностью трущихся деталей. Неправильный выбор смазочного материала, покрытия, конструкции деталей или технологии их изготовления, а также неполный учет условий эксплуатации, приводившие к серьезным последствиям и большим экономическим потерям, были следствием неудовлетворительных знаний инженерным составом вопросов триботехники.

Последующий опыт преподавания триботехники в институте повышения квалификации Госстандарта подтвердил необходимость широкой популяризации достижений триботехники, глубокого изучения ее разделов, взаимной информации и обмена опытом. Для решения важных задач по триботехнике в масштабах такой огромной отрасли, как машиностроение, особенно при создании новых высокопроизводительных машин, требуется основательная подготовка специалистов по триботехнике. Без знаний по триботехнике нельзя на должном уровне разработать фрикционный материал для тормоза, сконструировать двигатель внутреннего сгорания, изготовить сельскохозяйственную машину, разработать смазочный материал для автомобиля, отремонтировать металлообрабатывающий станок, определить причину аварии самолета, испытать новый тур-

бобур. В этих и многих других вопросах требуется активное участие специалистов, и именно специалистов по триботехнике.

В США, Великобритании, ФРГ, Франции, Польше и некоторых других зарубежных странах уже длительное время ведутся работы по подготовке специалистов по трению, изнашиванию и смазке машин. В одних странах инженерные кадры по триботехнике готовят на специальных факультетах повышения квалификации (Польша), в других — путем специализации студентов в высших учебных заведениях (ФРГ), в Великобритании подготовка кадров по триботехнике ведется в университетах. Так, обучение студентов триботехнике в Высшей технической школе г. Хемниц проходит по 10 спецкурсам, общий объем программ составляет 400 ч. В программах большое место отведено изучению новых методов повышения износостойкости деталей с уклоном на технику смазки. Отдельным курсом читается трибофизика и трибохимия.

Программа обучения студентов триботехнике содержит следующие предметы: 1) проектирование смазочных устройств; 2) испытательные станции смазочных устройств; 3) основы триботехники; 4) методы расчета и конструирования в технике смазывания; 5) средства рационализации в триботехнике; 6) оценка эксплуатационных свойств пар трения; 7) транспорт и транспортирующие устройства; 8) физические и измерительно-технические основы проблем трения и изнашивания; 9) расчет трубопроводов и смазочной аппаратуры; 10) прикладная химия смазочных материалов. В программу курса включена лекция, имеющая целью воспитание экономического мышления и бережного отношения к народному достоянию, а также навыков комплексного изучения дисциплин, на которых основана наука о трении и изнашивании.

Обучение построено таким образом, что выпускники данной специализации могут быть использованы во всех отраслях промышленности, а также в сооружении энергоустановок, химических установок, в приборостроении и в области транспортных средств.

Во Франции трибологию преподают как самостоятельную дисциплину уже более 30 лет [2]. Ранее трение и смазка преподавались как составная часть курсов по физике, химии и металлургии. Впервые курс трибологии был введен проф. Р Куртелем в спецшколе двигателей внутреннего сгорания при сотрудничестве с французским Институтом нефтехимии. Затем курс трибологии был введен в инженерной школе ISMCM/CESTI в 1956 г. В настоящее время практически во всех машиностроительных политехнических колледжах Франции введен курс или читаются лекции по трибологии. В некоторых университетах также читаются курсы по трибологии [2].

В России научные кадры по триботехнике готовят во многих городах (Москве, Пензе, Твери, Брянске, Саратове, Ростове-на-Дону, Омске, Томске, Владивостоке и др.). Однако инженерные кадры по триботехнике выпускаются лишь в некоторых университетах. В Институте повышения квалификации инженерно-технических работников в области стандартизации, качества продукции и метрологии (ВИСМ) Госстандарта с 1974 по

1980 г. было подготовлено 350 специалистов по триботехнике, что крайне недостаточно для народного хозяйства нашей страны.

Учитывая важность подготовки специалистов по триботехнике, Государственный комитет СССР по науке и технике еще в 1976 г. рекомендовал Министерству высшего и среднего специального образования СССР совместно с заинтересованными министерствами и ведомствами обеспечить:

— на специальных факультетах подготовку кадров (из числа лиц, имеющих соответствующее высшее образование и стаж практической работы) по проблемам повышения износостойкости машин и оборудования;

— организовать в системе повышения квалификации специалистов, работающих в различных отраслях промышленности, чтение лекций по проблемам износостойкости машин и оборудования для соответствующих служб предприятий.

В связи с этим Минвуз издал для системы повышения квалификации инженеров учебно-методические материалы к изучению курса "Основы триботехники (трение, изнашивание и смазка машин) и физико-химическая механика избирательного переноса". Приведем некоторые темы лекций по курсу.

I. Основы прочности поверхностного слоя деталей машин. Качество поверхности, физико-химические свойства и контактирование деталей; виды трения в узлах машин; механизм изнашивания деталей пар трения и рабочих органов машин; виды разрушения рабочих поверхностей деталей.

II. Конструктивные факторы повышения долговечности и надежности работы узлов трения машин. Вопросы выбора материалов для узлов трения; расположение материалов в парах трения; жесткость, податливость и специальная конфигурация деталей как фактор повышения износостойкости пар трения; принципы взаимного дополнения качества; конструктивные решения узлов трения, обеспечивающие высокую долговечность; смазка узлов трения; расчет типовых узлов трения на износ.

III. Технологические методы обработки трущихся деталей. Влияние точности размера, микрогеометрических отклонений и взаимного расположения деталей на износ; термическая, химическая и химико-термическая обработки деталей; гальванические покрытия поверхностей деталей; наплавка поверхностей деталей; поверхностное пластическое деформирование и выглаживание поверхностей; покрытия, нанесенные фрикционным методом и методом напыления; упрочнение поверхностей лазерным лучом.

IV. Эксплуатационные мероприятия по обеспечению надежности и долговечности узлов трения машин. Смазка машин в процессе эксплуатации, обкатка машин, стендовые и эксплуатационные испытания. Влияние режима работы машины на износ деталей; исследование технического состояния узлов трения на разных этапах эксплуатации машин; методы раннего обнаружения износа узлов трения машин в эксплуатации.

По курсу предусматривается проведение лабораторных и практических занятий, семинаров и занятий по обмену опытом. Изучение курса заканчивается сдачей экзамена и выполнением курсовой работы.

Помимо подготовки инженерных кадров по триботехнике необходимо организовать подготовку специалистов среднего звена. Для этого следует создать среднее учебное заведение по изучению смазочного хозяйства на предприятиях, ремонта узлов трения, новых методов повышения износостойкости деталей и других вопросов триботехники. Эти вопросы должны быть в центре внимания при проведении учебы с инженерно-техническими работниками в производственных объединениях, комбинатах, на заводах и фабриках. Для этого нужно создать хорошие кинофильмы, наглядные пособия, издать учебные пособия.

Вопросы подготовки кадров по триботехнике необходимо решать незамедлительно. Это окажет серьезное влияние на качество будущих машин, их долговечность, на экономию топлива и смазочных материалов, чёрных и дефицитных цветных металлов.

8.9. Разработка новой теории трения и безызносности

Что трение является неравновесным термодинамическим процессом, известно давно, но только в последние годы установлено, что при глубокой неравновесности и нелинейности возможна самоорганизация и образование структуры системы трения иного порядка, чем трение при граничной смазке. Таким образом, выявилась возможность работы при более совершенной системе, чем трение при граничной смазке, а одновременно и возможность существования разных (двух) систем трения — при граничной смазке и ИП.

Автор работ по термодинамической теории структур и самоорганизации в неравновесных системах И. Р. Пригожин установил, что некоторые открытые системы при переходе от равновесных условий к условиям, далеким от равновесных, становятся неустойчивыми и их макроскопические свойства радикально меняются. Такими свойствами обладают многие биологические системы, причем во всех случаях существует, видимо, термодинамический порог самоорганизации, четко разграничивающий класс равновесных структур и класс структур, называемых диссипативными, возникающих лишь при больших отклонениях от равновесия.

Применительно к трению твердых тел, которое всегда диссипативно, это означает переход за некоторую критическую зону, где при больших отклонениях от равновесного состояния физические системы ведут себя, как правило, нелинейно. Именно здесь проявляются самоорганизация и когерентное поведение подсистем, выражающееся в образовании систем снижения износа и трения (СИТ). По существу это открытие новых областей в физике и, в частности, в трении, где термодинамически возможная самоорганизация новых структур осуществляется в виде нового, более совершенного вида трения, чем трение при граничной смазке [7].

Процесс превращения механической энергии в тепловую происходит в поверхностном слое, деформируемом при трении на относительно небольшую глубину (приблизительно 0,1...0,3 мм) в зависимости от скорости скольжения и нагрузки. В этой зоне, являющейся генератором теплоты, возникают максимальные температуры и напряжения, происходит накапливание энергии в виде концентрации дислокаций и других дефектов решетки, ведущих к разрушению. Эта зона интенсивного воздействия силы трения на металл является ловушкой для водорода. Зона же контакта поверхностей является генератором водорода из влаги, воздуха, смазочного материала, пластмассы и других материалов и элементов среды. Существует большое число путей образования водорода при трении из указанных веществ, содержащих водород. Таким образом, изнашивание обусловливается не столько механическим взаимодействием поверхностей трения, сколько водородной хрупкостью поверхностного слоя. Степень наводороживания изменяется под действием факторов среды и внутренних условий и может ускорить изнашивание на один-два порядка. Решающую роль здесь играют термодинамические факторы.

Как нетрудно заметить, из изложенного ясно проступают черты новой концепции трения, основанной на глубокой теоретической проработке раздела физики — термодинамики образования самоорганизующихся структур при необратимых процессах. Как подтвердила практика, термодинамические процессы диссипации энергии трения оказались более фундаментальными, чем процесс разрушения поверхностей [8].

8.10. Триботехника, интересы здоровья и охраны окружающей среды

Этот вопрос к настоящему времени находится еще в стадии постановки, однако можно утверждать, что триботехника имеет непосредственное отношение к здоровью людей и охране окружающей среды.

На прошедшем в Москве в 1996 г. Международном конгрессе "Экологические проблемы больших городов: инженерные решения" было отмечено, что 70% загазованности больших городов в нашей страны падает на автомобильный транспорт. Это происходит в результате большой изношенности цилиндропоршневой группы двигателей автомобилей, падением их мощности и в связи с этим высоким потреблением ими топлива, смазочных материалов и малым ресурсом. Наши автомобили до последнего времени не снабжены нейтрализаторами, которые устанавливаются на выхлопную трубу.

Использование асбестосодержащих накладок в тормозах автомобилей, наличие паров топлива в кабинах транспортной техники, повышенные вибрации и шумы в машинах в результате износа подшипников, биение валов, зубчатых передач — все эти и им подобные недостатки, относящиеся к низкому уровню решения вопросов триботехники, оказывают существенное влияние на здоровье обслуживающего персонала и население города.

Причинами крупных аварий и катастроф были утечки через уплотнения взрывоопасных продуктов, задиры и повышенный износ ответственных трущихся деталей, разрушение контактных поверхностей подшипников, рельсов, бандажей колес, поломки зубьев шестерен, заклинивание плунжерных пар и т.п.

Развитие диагностических средств узлов трения машин и механизмов исключит возможность работы на неисправных машинах, а также снизит травматизм и другие последствия.

Многие стороны рассматриваемого вопроса будут решаться не только в рамках отдельных стран, но и в международном масштабе. Так, в морских портах установлен строгий контроль за судами в части загрязнения ими морской воды смазочным маслом; судно в этом случае подвергается штрафу. Как известно, такого рода загрязнения связаны и нарушениями уплотнений в двигателе, течью масла в забортных механизмах в результате износа или повреждений уплотнений.

Принимаются меры по более строгому контролю за автомобилями по загрязнению ими воздушной среды отработанными газами [26, 28]. Двигатели автомобилей с изношенными цилиндрами и поршневыми кольцами, как уже упоминалось, не только потребляют больше топлива, но и значительно увеличению загазованности городов и поселков.

Недостаточная износостойкость уплотнительных устройств, перегрев подшипников, износ валов часто вызывают течи масла, топлива, рабочей жидкости гидравлических систем. Все это приводит к непроизводительному потреблению энергии, порче асфальтовых покрытий и уничтожению растительности.

Непредусмотренный ремонт машин в пути, проведение технического обслуживания машин в полевых условиях приводит к загрязнению окружающей среды отходами масла, промасленной ветошью, к потерям топлива и т.п.

На отмеченном конгрессе было сделано более 20 докладов по вопросу экологической защиты больших городов рациональными решениями триботехники. В решении подсекции “Трибология на транспорте” конгресса записано о необходимости более широкого использования новых разработок, основанных на базе эффекта безызносности при трении и водородном изнашивании металлов: новых смазочных материалов, ФАБО и безразборного восстановления двигателей внутреннего сгорания. Как следует из докладов применение таких технологий позволяет:

— снизить загазованность атмосферы при работе автомобилей в 2—5 раз;

— сократить расход смазочных материалов в 2...5 раз и топлива до 3...7% ;

— повысить ресурс автомобильного двигателя в 1,5...2 раза;

— повысить надежность узлов трения и, тем самым, уменьшить аварии машин;

— во многих случаях заменить капитальные ремонты машин на ремонты без разборки [33].

Снижение выброса в окружающую среду отработанных картерных масел. Необходимо обратить особое внимание на попадание в окружающую среду отработанных картерных масел двигателей внутреннего сгорания и методов их утилизации. Проблема высокой концентрации многочисленных канцерогенных веществ (включая бензопирены) в отработанных картерных маслах может стать более серьезной, чем проблема выхлопных газов автомобилей. Приведем некоторые цифры из работы [29] по экономике и расходу масел.

В индустриально развитых странах приблизительно 4,5% валового национального продукта расходуется на трение, износ и коррозию подвижных сочленений технических изделий. Это приводит к потерям сырьевых материалов и энергии общей стоимостью несколько сотен биллионов долларов ежегодно во всем мире. Смазка составляет только 1% от общего расхода продуктов из минеральных масел. Но из-за неполного использования применение смазки составляет потенциальную проблему для окружающей среды. Использование масла колеблется от 20% для турбин и трансмиссий до 100% для масел, применяемых в двигателях, работающих на горючей смеси (смесь топлива с маслом).

В странах Европейского Экономического Сообщества общая продажа смазки составляет около 4,5 млн т в год, из них полностью используется только половина. Это немногим больше 2 млн т, которые расходуются следующим образом: 750 000 т — как топливо, почти 700 000 т – перерабатывается, 600 000 т – неконтролируемо исчезает в окружающую среду. Эти последние 600 000 т и представляют все возрастающую опасность.

После распада СССР такие цифры для России не поддаются учету, однако рассматриваемая проблема в силу ряда причин для России, по нашему мнению, еще более значительна.

В настоящее время существуют полностью разлагаемые масла для топливной смеси и стандартизован метод Европейского координационного совета по разработке методов испытаний (CEC-L-33T-82) для оценки и сравнения степени разложения их под действием бактерий, а также параметры, которые можно измерять и контролировать.

Наибольшую опасность для окружающей среды представляют моющие присадки к маслам, что вызывает увеличение количества загрязняющих примесей и накопление их в масле при картерной смазке. Среди этих загрязнений – полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) с сильно выраженными канцерогенными свойствами.

При картерной смазке в используемом масле обнаружено около 140 различных ПАУ. Они присутствуют и в свежем масле, но в гораздо меньших количествах. ПАУ образуются в основном из топлива и в процессе сгорания. При низкой концентрации ПАУ в топливе их концентрация в масле также очень мала [29].

Концентрация бензопирена в смазочном масле при картерной смазке двигателей с принудительным зажиганием для пассажирских автомобилей возрастает со скоростью примерно в 10 раз большей, чем для ди-

зельных двигателей. Для грузовых автомобилей и автобусов никакого увеличения концентрации ПАУ в смазочном масле не обнаружено.

Попадание масла в окружающую среду при картерной смазке происходит непосредственно с выхлопом, с твердыми частицами в выхлопных газах, путем утечки и при смене масла. По мере износа поршневых колец и цилиндров все большее количество масла попадает в окружающую среду с выхлопом.

Результаты исследований показывают, что концентрация (мг/км) канцерогенных ПАУ с 4...7 кольцами в масле двигателей внутреннего сгорания составляет:

— картерная смазка, двигатель с искровым зажиганием 270...400;

— картерная смазка, дизельный двигатель 20...30;

— двигатель с искровым зажиганием, работающий на топливной смеси 0, 2...0, 4.

При смене масла высококвалифицированным механиком в хорошо оборудованном гараже только очень небольшое количество масла попадает в окружающую среду. Однако 10...15% от всех замен масла проводятся любителями, которые, игнорируя предупреждения, помещают масло в бытовые отходы, сливают в сточные воды или просто выливают.

Отходы отработанного масла имеют тенденцию накапливаться, что видно в местах стоянок, гаражах и на центральных участках высокоскоростных дорог, особенно когда на дороге есть уклон. При выпадении осадков ПАУ, содержащиеся в масле, достигают сточных труб, попадают в реки, озера, оседают в донных отложениях. Очень часто отработанное масло у любителей просто не принимается, что вынуждает последних избавляться от него любыми путями.

Очень опасно использовать отработанное картерное масло для цепных пил. Мутагенность топливной смеси, состоящей из 1 л. картерного масла и 2...3 л топлива, на 4 порядка выше, чем выхлопной эмиссии двигателей цепных пил [29].

Применение топливной смеси должно быть рассмотрено при конструировании новых двигателей внутреннего сгорания, а также тех двигателей, которые традиционно до сих пор оборудованы картерной смазкой. Этот вопрос должен встать перед правительствами промышленных стран, заботящихся об экологии [29].

Канцерогенные вещества при износе деталей тормозов. Асбест в течение многих лет являлся одним из главных компонентов фрикционных материалов. Он обладает рядом уникальных свойств: большая механическая прочность, высокий коэффициент трения, низкая тепло- и электропроводность, химическая стойкость, доступность в цене и др.

В последние годы сначала в США, а затем в западной Европе резко усилилась кампания, направленная на повсеместный запрет асбеста и замену его искусственными минеральными волокнами. В России ведутся работы по поиску заменителей асбеста в составе тормозных изделий. Для наиболее нагруженных тормозов самолетов применяются углеродные материалы. Проводятся исследования по определению допустимого содержания асбеста в тормозных деталях [12, 19].

Помимо асбеста для улучшения трибологических показателей фрикционных тормозов в композициях для изготовления тормозных накладок применяется ряд добавок как сульфиды, например дисульфид молибдена, дисульфид титана, сульфид свинца, сульфид сурьмы и сульфид олова [42].

Разложение этих сульфидов металлов преимущественно происходит при температурах ниже 500°С. Однако обнаружено, что при тяжелых условиях торможения температура поверхности тормозных дисков превышает 800°С. Некоторые сульфиды металлов при этом разрушаются с образованием оксидов металлов. Например, дисульфид титана при разложении образует на рабочих поверхностях тормоза слой из двуокиси титана. Этот слой обладает очень высокой износостойкостью и предохраняет металлический основной материал от сильного износа (возможно от проникновения диффузионно-способного водорода). Таким же образом действует и дисульфид сурьмы. При разложении дисульфида олова образуется металлическое олово и вместе с другими металлами с низкой точкой плавления, например с цинком и медью, образуют на поверхности тормозных дисков припаянное покрытие из сплавов. Благодаря такому сплаву значительно улучшается распределение тепла по поверхности, повышается износостойкость тормозных дисков и снижается образование трещин на поверхности дисков. Однако трисульфидсурьмы и оксид свинца признаны токсичными веществами, и поэтому возникла необходимость исключить эти сульфиды металлов из современных композиций для изготовления тормозных накладок [42].

В качестве твердых смазок для тормозных накладок чаще всего применяют графит. Трибологические свойства графита подвержены влиянию влажности, что ограничивает его применение. Коэффициент трения и износостойкость при различных скоростях и давлениях различны, поскольку влажность понижается при увеличении температуры поверхности. У дисульфида молибдена этого не наблюдается. Поверхность молибдена обладает определенной полярностью, что придает этой твердой смазке ценные свойства.

Автором [42] разработана технология, по которой чешуйки графита покрываются неорганическим веществом, придающим графиту полярность.

Поскольку поляризованный графит образован из графита и неорганического поляризующего агента, например молибдатов, фосфатов и сульфатов, эту новую добавку можно считать экологически чистой добавкой для композиций тормозных накладок. Образования токсичных продуктов при разложении композиций не обнаружено.

Поляризованный графит в качестве добавки к композициям для тормозных накладок применяется в смесях для накладок легковых, грузовых автомобилей и железнодорожных колодок [42].

К сказанному следует добавить, что теоретическое обоснование к положительному действию поляризации на контакте следует искать еще в целенаправленном движении образующего при работе накладок водо-

рода. Такая идея была высказана несколько лет тому назад В.И. Колесниковым при изучении им водородного износа колодок железнодорожного транспорта.

8.11. Программа исследований водородного изнашивания и избирательного переноса (ИП)

Избирательный перенос при трении и водородное изнашивание металлов, подробно рассмотренные в нашей книге, — это два совершенно противоположных явления. Все процессы, протекающие при водородном изнашивании, направлены на то, чтобы разрушить поверхностный слой, усилить интенсивность изнашивания, облегчить процесс диспергирования. При ИП процессы направлены на снижение контактных давлений, уменьшения разрушения поверхностного слоя, компенсацию уноса частиц износа, создание условий полно безызносности. Физические механизмы как водородного изнашивания, так и ИП, сложны. В зоне фрикционного контакта на одних участках поверхности может протекать один процесс, а на других – другой. Кроме того, одно явление может подавлять другое.

Изучение водородного изнашивания и ИП находятся еще в начальной стадии, поэтому как в теоретическом плане, так и в плане разработки и реализации в промышленности новых методов борьбы с изнашиванием машин и оборудования на основе этих явлений мы видим в будущем комплексе исследований, результаты которых могут решить задачи, поставленные перед триботехникой.

Исходя из известных представлений о водородном изнашивании, выполненных научно-исследовательских работ и потребностей производства, можно рекомендовать следующие направления работ:

разработки приборов и методов исследования водородного изнашивания деталей машин;

изучение процессов наводороживания металлов при трении с фрикционными пластмассами для оценки количественных характеристик перераспределения водорода в поверхностных слоях, изучение свойств наводороженного металла при трении, влияние режимов трения на наводороживание с широким использованием новейших методов исследования;

исследование наводороживания наиболее изнашиваемых деталей машин и оборудования в процессе эксплуатации и оценка вклада в снижение их износостойкости как биографического, так и образуемого при трении водорода с целью разработки требований к качеству конструкционных материалов, смазочным материалам и специальным жидкостям, применяемым в узлах трения;

исследование влияния электрического и магнитного полей на процессы наводороживания при трении с целью определения количественных характеристик процессов и разработки новых путей борьбы с водородным изнашиванием;

изучение процесса наводороживания поверхностей трения при различных видах обработки поверхностей трения деталей (механические, термические и химико-термические);

исследования подавления водородного изнашивания пары трения металл – древесина с целью повышения режущего инструмента при обработке древесных изделий;

разработка методов подавления водородного изнашивания в узлах трения, смазываемых водой при высоких давлениях и скоростях скольжения;

разработка методов подавления водородного изнашивания узлов трения с титановыми сплавами с целью повышения их антифрикционных характеристик и расширения применения в узлах трения;

изучение общих закономерностей водородного изнашивания и выявления областей его проявления, а также создания научных основ борьбы с ним;

изучение действия водорода при абразивном изнашивании в условиях действия коррозионно-активных сред и повышенной влажности, фреттинг-коррозии, контактной усталости, коррозионно-механического изнашивания, кавитации и эрозии;

разработка методов подавления водородного изнашивания деталей авиационной техники, нефтехимического оборудования, железнодорожного транспорта (рельсов, колес, деталей двигателей тепловозов, в частности цилиндров и поршневых колец), инструмента по обработке меховых изделий, деталей сельскохозяйственных машин и других отраслей техники.

К первоочередным задачам по изучению ИП при трении следует отнести:

создание комплекса приборов и установок для изучения ИП;

исследование работоспособности шариковых и роликовых подшипников, а также зубчатых передач в условиях ИП;

создание новых эффективных металлоплакирующих присадок к смазочным материалам, обеспечивающих режим ИП в двигателях внутреннего сгорания как для приработки, так и для установившегося режима работы;

исследование конструктивных особенностей смазочных систем при работе на металлоплакирующих смазочных материалах, определение их эксплуатационных характеристик и оценка эффективности их применения;

исследование возможности применения ИП при штамповке, дорновании, протяжке, определение оптимального состава смазочно-охлаждающих жидкостей и их эффективности;

исследования трения без смазочного материала в режиме ИП в парах металл – металл, металлополимер – металл;

разработка новых масел и смазок, обеспечивающих металлоплакирование в зоне контакта трущихся деталей, создание опытного производства таких материалов и внедрение их на промышленных предприятиях. В большем объеме перспективные исследования даны в работе [6].

ЧАСТЬ I

ИЗНОС

Глава 1. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

1. Общие сведения о поверхности деталей и ее геометрии

В технике под поверхностью детали понимают наружный слой, который по строению и другим физическим свойствам отличается от внутренней части. Комплекс свойств, приобретаемых поверхностью детали в результате ее обработки, характеризуется обобщенным понятием "качество поверхности" [1, 4, 5].

Качество поверхности определяется геометрией поверхности как границей тела и физико-химическими свойствами, обусловленными процессом ее образования при обработке детали. Качество поверхности деталей машин влияет на такие их служебные свойства, как сопротивление усталости, износо-, коррозие- и эрозиостойкость, и связано с такими свойствами сопряжений, как прочность посадок с натягом и плотность подвижных и неподвижных соединений.

Детали на чертежах изображают в виде элементов, ограниченных поверхностями строго определенной геометрической формы, и мысленно такими нам представляются. Всякое реальное тело имеет отклонения от идеальной геометрической формы, именуемые погрешностями.

Погрешности обработанной поверхности с точки зрения причин их образования и методов измерительной техники, применяемых для их определения, можно подразделить на три категории: макрогеометрические отклонения, волнистость поверхности, шероховатость поверхности.

Макрогеометрическими называют отклонения, при которых форма поверхности отклоняется от заданной. Так, детали с боковой поверхностью кругового цилиндра могут иметь следующие погрешности: отклонения контура от окружности (овальность, огранка); отклонения от прямолинейности образующих при прямолинейности оси цилиндра (бочкообразность, корсетность); отклонения от прямолинейности образующих (конусность); криволинейности оси. Величина и характер этих отклонений могут быть определены путем измерения диаметра детали в различных поперечных сечениях по длине, а в данном поперечном сечении — в различных направлениях; дополнительно должен быть использован индикатор часового типа. У плоских поверхностей возможны выпуклость, вогнутость и т.п.

Возникновение макрогеометрических погрешностей поверхности происходит в основном из-за неточностей станка, на котором происходит обработка, погрешностей установки заготовок, силовых и температурных деформаций системы станок-заготовка-инструмент и износа инструмента в процессе обработки детали.

Под волнистостью поверхности понимают совокупность более или менее регулярно чередующихся возвышений и впадин с шагом волны, значительно превышающим ее высоту (рис. 1.1).

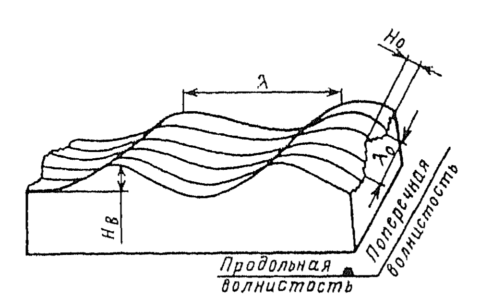


Рис.1.1. **Схема волнистости поверхности:**
λ — шаг волны в продольном раправлении; *Нв* — высота волны в продольном направлении; λ_0 — длина волны в поперечном направлении; H_0 — высота волны в поперечном направлении

Волнистость в направлении главного движения при резании называют продольной, а в перпендикулярном направлении — поперечной.

Волнистость поверхности образуется в результате неравномерности подачи при точении и шлифовании, неплоскостности направляющих и вынужденных колебаний системы станок-изделие-инструмент, возникающих из-за неравномерности силы резания, наличия неуравновешенных масс и т.д. Из других причин укажем на копирование волнистости режущего инструмента, искажение формы шлифовального круга и неравномерный износ его, а также погрешности движения инструмента или изделия. При шлифовании сильно сказывается дисбаланс шлифовального круга. При зубофрезеровании ошибка червяка делительной передачи станка проявляется в виде волнистости боковой поверхности зуба. От шероховатости волнистость поверхности отличается значительно большим шагом: при чистовой обработке он не менее 0,25 мм, при грубой — превышает 8 мм. Нередко бывает, что высота волны при чистовом точении и цилиндрическом шлифовании доходит до 15 мкм при шаге до 14 мм.

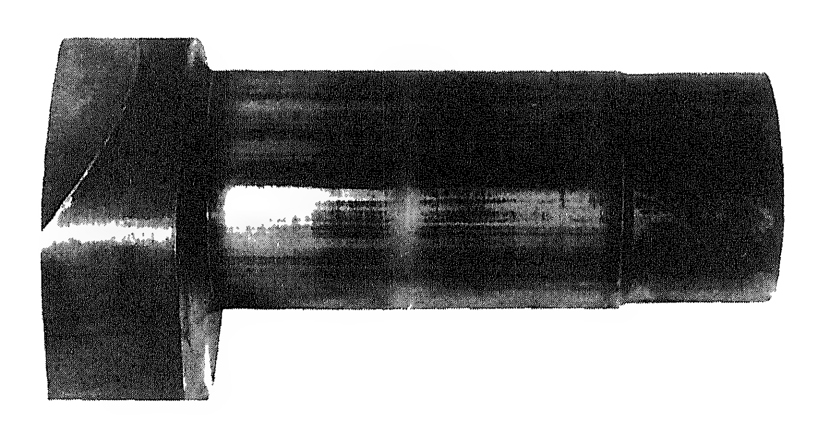


Рис. 1.2. **Шейка коленчатого вала с волнистой поверхностью**

На рис.1.2 показана шатунная шейка коленчатого вала авиационного двигателя с волнистостью, обнаруженной после износа оксидного слоя на вершинах волн. Реальная поверхность не является гладкой, она имеет неровности: выступы и впадины с относительно малым расстоянием между ними. Эти неровности, образующие в совокупности рельеф поверхности, называют шероховатостью поверхности. Иногда их именуют микронеровностями. Контур сечения реальной поверхности плоскостью, перпендикулярной соответствующей идеальной геометрической поверхности, образует профиль, характеризующий микрогеометрию поверхности изделия. Графическое изображение реального профиля по данным измерений шероховатости называют профилограммой шероховатости. Так как через данную точку геометрической поверхности можно провести бесчисленное множество нормальных сечений, то шероховатость поверхности следует связывать с тем или иным направлением.

Обработанную резанием поверхность можно в первом (грубом) приближении рассматривать как след рабочего движения режущей кромки инструмента (рис. 1.3).

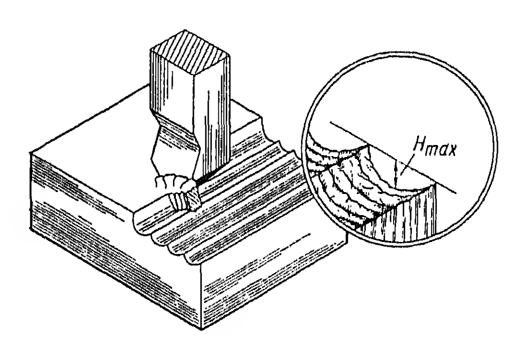


Рис. 1.3. **Шероховатость поверхности плиты, полученная при обработке на строгальном станке:**
*Н*мах – максимальная высота неровностей в направлении возвратно-поступательному движению стола

При строгании форма режущей кромки и перемещение резца в конце каждого холостого хода на величину подачи определяют шероховатость поверхности — образование рисок в направлении, перпендикулярном возвратно-поступательному движению стола. Зазубрины на режущей кромке резца образуют шероховатости во впадинах между гребешками. При точении след режущей кромки представляет собой винтовую поверхность с шагом, равным подаче резца за один оборот заготовки.

Шероховатость обработанной поверхности в направлении главного движения при резании именуют продольной, а в направлении подачи — поперечной шероховатостью. Преобладающее направление следов механической обработки поверхности или следов трения называют направлением неровностей.

2. Шероховатость поверхности

Шероховатость поверхности — размерная характеристика поверхности. Количественно шероховатость можно оценить по тем или иным показателям. Свойства поверхности определяются не только высотными характеристиками неровностей: на рис. 1.4 приведены два профиля поверхности, эксплуатационные свойства которых различны, хотя значения высотных параметров для них одинаковы. В связи с этим ГОСТ 2789-73 предусматривает шесть параметров, характеризующих шероховатость поверхности: три высотных — R_a, R_z и R_{max}. Два шаговых — S и S_m и относительная опорная длина профиля t_p.

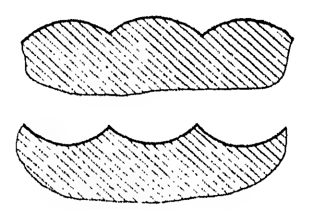


Рис. 1.4. Два профиля поверхности с одинаковыми высотными параметрами

Средним арифметическим отклонением профиля Ra называют среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины 1 (рис. 1.5.):

$$R_a = \frac{1}{\ell}\int_0^{\ell} |y(x)| \cdot dx \quad \text{или} \quad R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |y|$$

На профилограмме положение средней линии профиля определяют так, чтобы площади F по обе стороны от нее до контура профиля были равны, т. е. чтобы:

$$\int_0^{\ell} y(x) \cdot dx \quad \text{или} \quad F_1 + F_3 + \dots + F_{n-1} \approx F_2 + F_4 + \dots + F_n$$

Относительная однородность микронеровностей поверхности детали позволяет судить о шероховатости в данном направлении по результатам обследования участка сравнительно небольшой длины. Длину базовой линии, используемую для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности, называют базовой длиной l.

Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z представляет собой сумму средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины (рис.1.5):

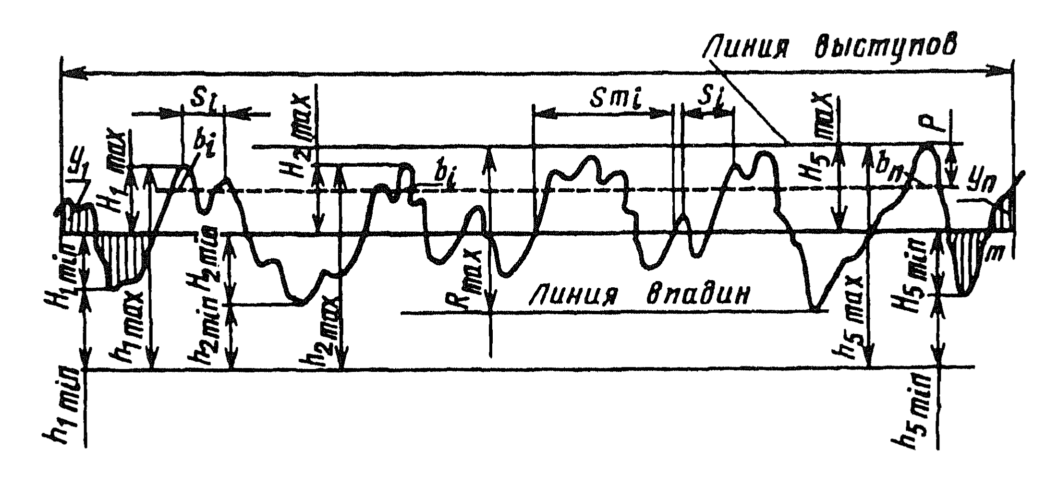


Рис. 1.5. **Параметры шероховатости поверхности**

$$R_z = \frac{1}{5}\left(\sum_{i=1}^{5}\left|y_{pi}\right| + \sum_{i=1}^{5}\left|y_{\upsilon i}\right|\right),$$

где y_{pi} — высота i-го наибольшего выступа профиля; y_{vi} — глубина i-й наибольшей впадины профиля.

Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} является полной высотой профиля, т. е. расстоянием между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Средний шаг местных выступов профиля S — среднее значение шагов местных выступов профиля в пределах базовой длины:

$$S \approx \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} S_i .$$

Средний шаг неровностей профиля S_m — среднее значение шага неровностей профиля по средней линии в пределах базовой длины:

$$S_m \approx \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} S_{mi} .$$

Параметры S и Sm дают представление о расстояниях между характерными точками пересечения профиля со средней линией.

Относительная опорная длина профиля t_p — отношение опорной длины профиля, равной сумме длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии в пределах базовой длины к базовой длине:

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i}{l}.$$

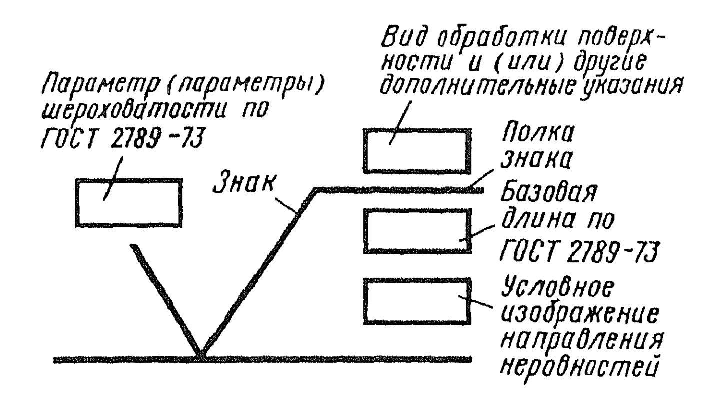


Рис. 1.6. **Обозначения шероховатости**

Параметр t_p характеризует форму неровностей профиля, давая представление о распределении высот неровностей по уровням сечения профиля.

Параметры S и S_m в комплексе с высотными параметрами R_a и R_z позволяют определить кроме высоты неровностей еще и их уклон, что имеет значение для антифрикционных характеристик трущихся поверхностей.

Параметры шероховатости поверхности могут применяться на практике только при обеспечении справочными данными о зависимости этих параметров от режимов обработки, хотя бы для наиболее распространенных видов механической обработки. Кроме того, должны быть проведены тщательные исследования по влиянию рассмотренных параметров на эксплуатационные свойства деталей машин.

Кроме шести рассмотренных параметров ГОСТ 2789—73 предусматривает использование еще двух характеристик — направление неровностей и вид обработки. Установлено шесть типов направлений неровностей: параллельное, перпендикулярное, перекрещивающееся, произвольное, кругообразное и радиальное. Стандарт не устанавливает взаимосвязи между параметрами R_a, R_z и базовой длиной l.

Обозначения шероховатости поверхности на чертежах устанавливает ГОСТ 2.309—73.

Значения параметров шероховатости указываются в ее обозначении (рис. 1.6).

Профилограммы обработанной поверхности, как правило, имеют вид острой пилы; это является результатом того, что вертикальное увеличение во много раз больше горизонтального (например, 40 000 и 400 соответственно). Иногда создается представление, что при трении обработанные поверхности зацепляются как две пилы своими зубцами. В действительности профиль поверхности выглядит иначе (рис. 1.7). Отдельные неровности имеют пологую форму. Угол между плоскостью основания выступа профиля и касательной к его боковой поверхности составляет при доводке 1...3°, при шлифовании 10° и при точении 20°. Самые глад-

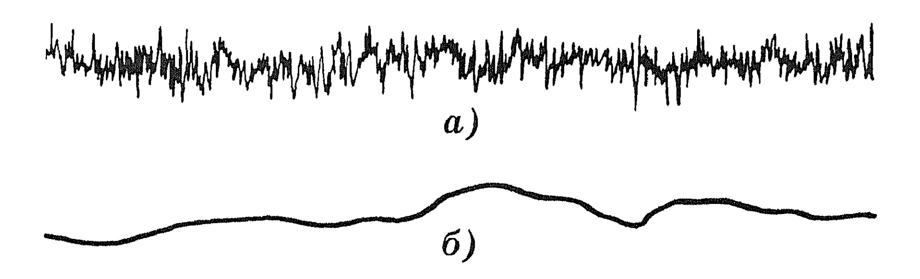


Рис. 1.7. **Профилограмма стальной поверхности после шлифования:**
а — вертикальное увеличение 40 000, горизонтальное увеличение 400; *б* — действительный профиль поверхности при одинаковых вертикальном и горизонтальном увеличении

кие металлические поверхности имеют неровности высотой порядка 100 межатомных расстояний.

Поскольку на образование поперечной шероховатости влияют такие факторы, как форма режущей кромки инструмента и величина подачи, не отражающиеся на продольной шероховатости, то обычно размеры поперечной шероховатости в 2...3 раза превосходят размеры продольной шероховатости. Поэтому шероховатость поверхности оценивают по результатам измерения поперечной шероховатости.

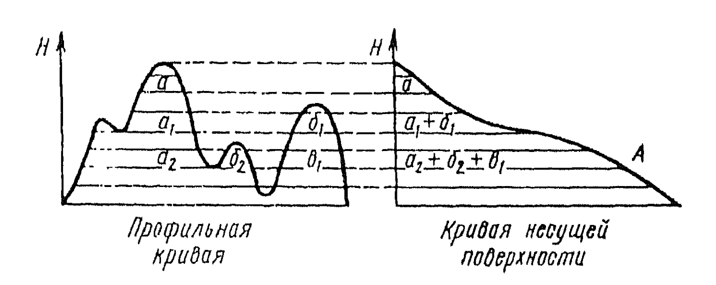
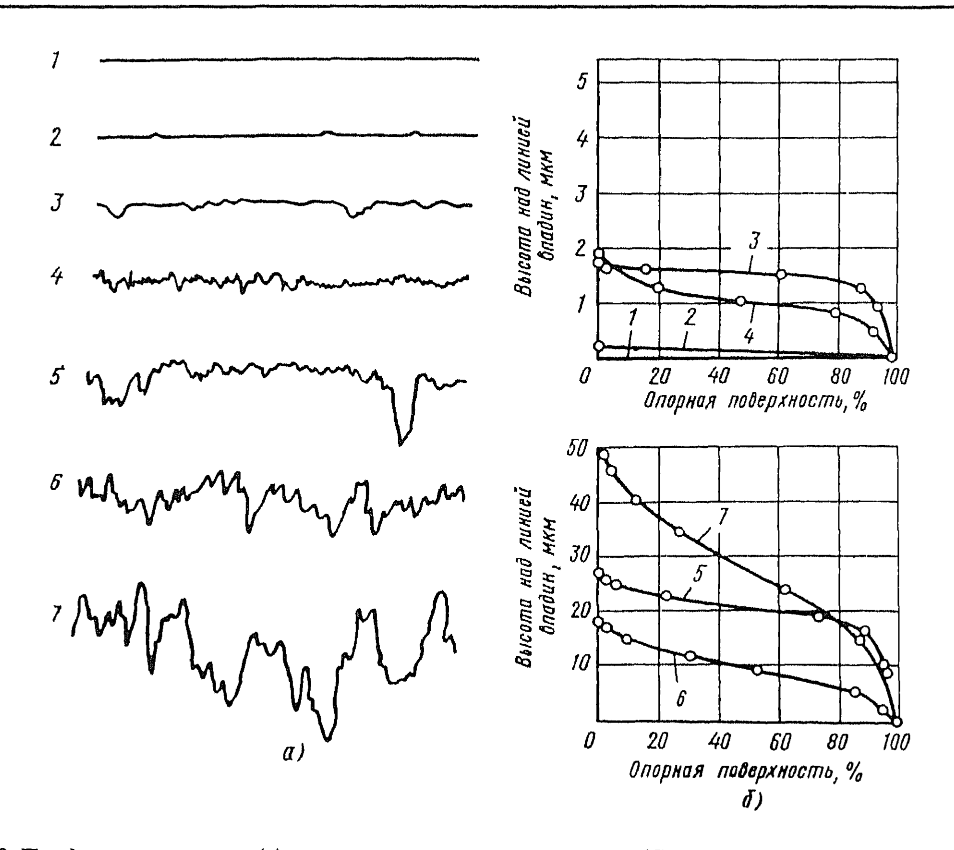


Рис. 1.8. **Профильная кривая и кривая несущей поверхности**

Для характеристики профильной кривой в целом служит кривая несущей поверхности. Для ее построения рассечем профильную кривую прямыми, параллельными линии впадин. Общую длину лежащих внутри профильной кривой отрезков на той или иной высоте отложим в виде отрезков (рис.1.8). В результате чего получим искомую кривую, отображающую в какой-то мере увеличение несущей площади детали по мере срабатывания ее наружных слоев.

Кривую несущей поверхности по данным ряда исследований можно разделить на три участка: первый — отрезок кривой, обращенной выпуклостью вниз; второй-выпуклостью вверх. Если принять во внимание шероховатости в различных направлениях, то пространственная модель не-



1.9. **Профильные кривые (а) и кривые несущей поверхности (б) для различных поверхностей**:

1 – идеальной; *2* – мерительной плитки; *3* – после лапингования; *4* – после шлифования; *5* – после фрезерования; *6* – после тонкого растачивания; *7* – после сверления

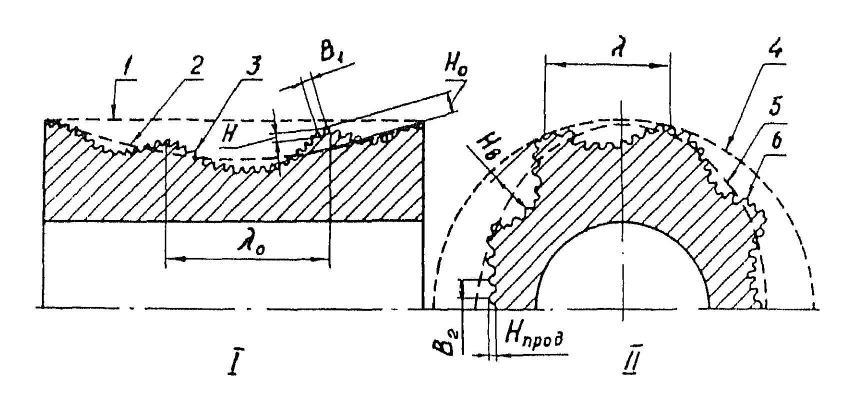


Рис. 1.10. **Схематическое изображение сочетания различных категорий отклонения реальной поверхности от идеальной** (по данным П.Е. Дьяченко):

1 — заданный чертежом цилиндр; *2* — корсетность; *3* — реальный профиль изделия; *4* — овальность; $H_в$, λ — высота и длина волны в направлении движения инструмента; H_0, λ_0 — высота и длина волны поперек движения инструмента; $H_в$, $H_{прод}$ — высоты неровностей, расположенных соответственно перпендикулярно и по направлению движения инструмента; B_1, B_2 — шаг неровностей в поперечном и продольном направлениях

сущей поверхности представит собой для первого участка конус с кривой образующей, для второго — усеченный конус с прямолинейной образующей и для третьего — усеченный конус, но с криволинейными образующими.

На рис. 1.9 представлены кривые несущей поверхности при различной обработке. Действительная поверхность имеет отклонения всех трех категорий. Схематически это показано на примере цилиндрической поверхности (рис 1.10).

3. Геометрия поверхности как функция процесса обработки

Шероховатость обработанной поверхности обусловлена не только геометрией процесса резания, но и пластическими деформациями материала при этом процессе и вибрацией инструмента. Для пояснения обратимся к анализу процесса точения пластичных материалов с точки зрения качества формируемой поверхности.

При скоростях резания 1...2 м/мин углеродистых конструкционных сталей образуется стружка скалывания (элементная стружка). Она легко отделяется при малом тепловыделении и без заметной пластической деформации обработанной поверхности. Микронеровности незначительны, а форма их впадин близка к форме вершины резца. При увеличении скорости резания до 20...30 м/мин изменяется характер стружкообразования и шероховатость поверхности возрастает. Рост скорости резания сопровождается повышением температуры в зоне резания и значительным давлением (несколько тысяч гигапаскалей). Это давление вызывает пластическое течение как в отделяемом металле, так и в заготовке выше и ниже линии среза (рис. 1.11).

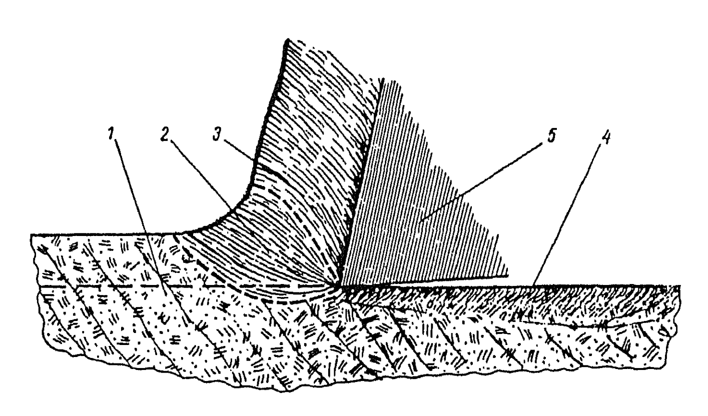


Рис. 1.11. Образование деформированного слоя при резании пластичного металла: 1 — основная структура обрабатываемого металла; 2 — зона пластической деформации; 3 — стружка; 4 — пластически деформированный .поверхностный слой; 5 — инструмент

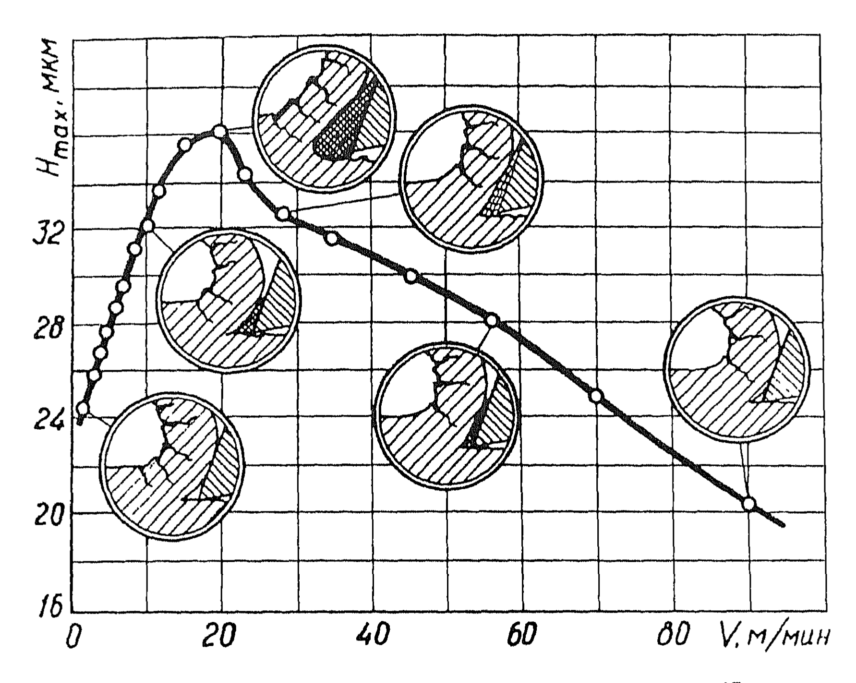


Рис. 1.12. **Высота неровностей в зависимости от скорости резания стали 45**

Стружка обтекает вершину резца; при этом наиболее удаленный от резца слой стружки имеет скорость, близкую к скорости резания, а слой, непосредственно соприкасающийся с передней гранью, подвержен сильному тормозящему действию сил трения. В итоге наиболее близкие к передней грани резца слои прилипают к ней, образуя застойную зону или нарост на лезвии инструмента. Металл начинает течь по наросту.

В процессе резания к наросту привариваются новые слои, пока он не достигнет максимально возможных размеров в данных условиях. Вершина нароста, выступая впереди лезвия инструмента, режет металл, оставляя глубокие борозды на обрабатываемой поверхности, а в бороздах следы весьма неровной кромки.

Время от времени вершина нароста обламывается и уносится частично со стружкой, а частично вдаливается в обработанную поверхность, увеличивая ее шероховатость. Процесс образования нароста повторяется. Нарост имеет наибольшую высоту и наибольшую стойкость при температуре около 200°С. В этой области конструкционные стали имеют наибольший предел прочности. Возрастание скорости резания выше 20 м/мин приводит к увеличению выделяемой в процессе стружкообразованием теплоты и к росту температуры нароста. Прочность нароста снижается и он разрушается при меньшей высоте. При скорости резания более 80 м/мин нарост не образуется (рис. 1.12).

Отсутствие нароста при резании не означает, однако, что действительный профиль обработанной поверхности даже при отсутствии вибраций будет совпадать с теоретическим. Пластическое течение материала в зоне резания вызывает дополнительное увеличение высот неров-

ностей. Кроме того, перемещение задней грани инструмента по свежеобразовавшейся поверхности, не успевшей покрыться слоем окислов, сопровождается мельчайшими задирами, играющими существенную роль в образовании дополнительных неровностей.

При обработке чугуна и других хрупких материалов образуется стружка надлома, элементы которой могут скалываться либо по линии среза, либо по границам зерен. При малой скорости резания зерна не подрезаются, а вырываются, и впадины неровностей располагаются под линией среза. При высоких скоростях резания зерна не вырываются, неровности образуются преимущественно режущим лезвием инструмента, и шероховатость обработанной поверхности снижается.

Процесс образования неровностей на обрабатываемой поверхности при торцовом фрезеровании в значительной мере аналогичен образованию неровностей при точении. При цилиндрическом фрезеровании как по направлению, так и против направления подачи образуются неровности с шагом, равным подаче на один зуб фрезы; продольная шероховатость обычно больше поперечной. На высоту неровностей влияет также неточное расположение режущих кромок различных зубьев фрезы по радиусу, эксцентричность осей фрезы и оправки и неточность станка.

Рассмотрим для примера наружное круглое шлифование. Специфические особенности шлифования следующие: отсутствует сплошная режущая кромка; зерна абразива имеют неправильную геометрическую форму и расположены беспорядочно на рабочей поверхности шлифовального круга; зерна абразива хрупкие и способны разрушаться по плоскостям спайности при динамическом воздействии абразивного зерна на обрабатываемый поверхностный слой и наличии интенсивного скольжения зерен по металлу за время, предшествующее непосредственному их врезанию.

При первом рабочем обороте шлифовального круга абразивные зерна прорезают канавки в некотором продольном сечении заготовки. При следующем обороте в том же сечении они делают новые канавки, а также выравнивают и уменьшают высоту первых неровностей. Постепенно число канавок возрастает, размеры несрезанных участков уменьшаются, а вместе с ними снижается и шероховатость поверхности. С увеличением частоты вращения круга возрастает эффект выравнивания неровностей. На размеры неровностей существенно влияет продольная подача при правке круга алмазным карандашом, вытачивающим на периферии круга канавку хода, равного подаче алмаза за один оборот круга. Неровности увеличиваются при возрастании подачи. Неровности шлифованной поверхности не имеют регулярного шага.

Большинство абразивных зерен шлифовального круга имеют неблагоприятную для резания форму граней. Расщепление зерен и округление их граней в процессе работы еще более ухудшают геометрию. Поэтому шлифование протекает при более высоком давлении, чем при любом другом методе обработки металлов резанием. Значительные силы трения в процессе шлифования, скольжение зерна по обрабатываемой

поверхности в момент его врезания и высокие скорости резания вызывают мгновенное локальное повышение температуры и сложное пластическое деформирование поверхностных слоев. Сильно деформированные слои вытягиваются в направлении резания, образуя местные скопления металла. Возможно местное оплавление поверхности в случае работы отдельных зерен или группы их, имеющих невыгодную геометрию резания. Профиль рисок из-за высокой пластической деформации шлифуемой поверхности не имеет четких очертаний, как это было бы, если бы риски точно копировали форму абразивных зерен и траекторию их движения относительно обрабатываемой поверхности.

Имеются попытки представить профиль неровностей поверхности аналитически, в виде суммы двух компонент, первая из которых является систематической и определяется управляемыми факторами процесса обработки, а вторая — случайной и вызывается нерегулярными воздействиями на процесс образования поверхности [2].

.При механической обработке деталей в их поверхностных слоях происходят изменения механических свойств и структуры металла под давлением режущего инструмента и под влиянием выделяющейся при резании теплоты. Кроме того, при резании, как при термической и термохимической обработке металлов и нанесении новых слоев (гальванические покрытия, металлизация напылением, наплавка) в деталях развиваются остаточные напряжения.

4. Остаточные напряжения

Остаточными напряжениями называют напряжения, существующие в теле при отсутствии внешних силовых воздействий на него. Наличие этих напряжений обусловлено неравномерностью температуры по объему тела, образованием во время нагрева или охлаждения новых структур с иной плотностью, наличием включений и др. Остаточные напряжения образуют равновесную систему. В зависимости от объема, который охватывается этой системой, различают собственные напряжения трех родов. Напряжения первого рода уравновешиваются в крупных объемах, соизмеримых с размерами детали; напряжения второго рода (микронапряжения) уравновешиваются в пределах одного или нескольких кристаллических зерен; напряжения третьего рода — субмикроскопические искажения кристаллической решетки. Напряжения второго и третьего рода не имеют ориентировки относительно осей детали.

Пластическая деформация вызывает уменьшение плотности металла или, что то же, увеличение его удельного объема. Пластически деформированный при резании слой не может свободно увеличиваться в объеме (этому препятствует недеформированный металл изделия), поэтому в наружном слое проявляются напряжения сжатия, а в остальной части напряжения растяжения. Это рассуждение предполагает, что деформируемый слой не находится даже частично в состоянии ползучести. В за-

висимости от температуры металл может быть в упругом и пластичном состоянии. В состоянии ползучести металла силы упругости не проявляются, и деформация протекает без стремления материала к восстановлению формы. За температуру $t_р$ перехода из упругого состояния металла в пластическое можно принять 450°С для углеродистых сталей и 550°С для легированных.

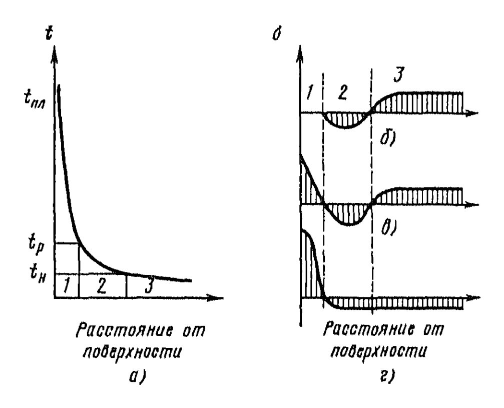


Рис. 1.13. **Схема образования остаточных температурных напряжений в поверхностном слое:** *а* — температура изделия при обработке; *б* — распределение напряжений в теле изделия при обработке; *в* — напряжения после остывания наружного слоя до температуры $t_р$; *г* — остаточные температурные напряжения

Средняя температура поверхностного слоя стали при шлифовании составляет 300...400°С, у самой поверхности 800...850°С. Температуры того же порядка развиваются при скоростном точении.

Нагрев поверхностного слоя металла при обработке обусловливает образование в нем температурных напряжений. Допустим, что в процессе обработки цилиндрической детали слой *1* (рис. 1.13) находится в состоянии ползучести. В этом слое внутренние напряжения отсутствуют, а если до того существовали остаточные напряжения, то они снимаются. В слое *2* с температурой ниже $t_р$, но выше нормальной $1_ц$ возникают напряжения сжатия, а в слое *3* — растяжения. Напряжения эти временные. Как только наружный слой охладится до температуры $t_р$, он станет упругим. Встречая сопротивление сокращению, он оказывается растянутым в окружном направлении. В слое *2* сжимающие напряжения возрастают. При дальнейшем охлаждении до полного выравнивания температуры по глубине металла растягивающие напряжения в слое *1* возрастают, а в слоях *2* и *3* устанавливается система уравновешивающих сжимающих напряжений. По характеру остаточные температурные напряжения, равно как и обусловленные пластической деформацией, являются напряжения-

ми первого рода. Однако из-за неодинакового тепловыделения на смежных участках обрабатываемой поверхности и различной степени пластической деформации возникают также остаточные напряжения второго рода.

Итак, при обработке металла в его наружном слое под влиянием пластической деформации при отсутствии ползучести развиваются остаточные напряжения сжатия, тепловой же эффект от резания приводит к растягивающим напряжениям. Так как оба фактора действуют совместно, то знак остаточного напряжения в наружном слое зависит от того, какой из факторов превалирует. Разумеется, если температура на обрабатываемой поверхности менее t_p, то температурные напряжения являются временными, после выравнивания температуры они исчезают.

5. Структурные и фазовые превращения

Пластическая деформация, в том числе и при резании металлов, обусловливает изменение микроструктуры. Беспорядочно расположенные в исходной структуре металла кристаллические зерна при пластической деформации приобретают однородную ориентацию (текстуру). Более глубокие изменения возможны при обработке металлов, воспринимающих закалку. В результате высокого поверхностного нагрева, а также быстрого охлаждения возможны фазовые превращения и структурные изменения. Так, в процессе шлифования закаленной и отпущенной стали образуется приповерхностный слой аустенитно-мартенситной структуры из вторично закаленного металла. Этот слой лежит на слое, имеющем структуры всех стадий отпуска вплоть до структуры исходного термически обработанного металла. Слой измененной структуры при нормальных условиях шлифования имеет почти равномерную толщину. Такие же превращения наблюдаются при точении. Так как каждой структурной составляющей свойствен присущий ей удельный объем, то фазовые и структурные превращения наряду с пластической деформацией являются источником остаточных напряжений.

Местные фазовые и структурные превращения поверхностного слоя шлифуемой детали известны под названием шлифовочных прижогов. Они образуются вследствие интенсивного (почти мгновенного) тепловыделения на небольшом участке поверхностного слоя. При шлифовальном круге нормальной твердости, нормальном режиме шлифования и достаточном охлаждении прижоги возникают из-за вибрации круга (циклические прижоги), неправильной установки детали на центрах и т. п. В области прижогов образуются остаточные напряжения. Прижоги являются структурными концентраторами напряжений, понижающими как сопротивление усталости, так и износостойкость.

Фазовые и структурные превращения при обработке инструментом возможны только для металлов с метастабильной структурой.

В случае холодной пластической деформации металла повышаются его твердость и предел прочности при одновременном снижении от-

носительного удлинения и относительного поперечного сужения при растяжении. Это явление называют упрочнением металла или наклепом.

При резании металлов протекают два противодействующих процесса: упрочнение в результате действия сил резания, которое тем выше, чем больше давление резания, и разупрочнение — снятие наклепа за счет повышающейся температуры резания. Степень наклепа и толщина наклепанного слоя при прочих равных условиях зависят от режима резания.

6. Показатели качества поверхности

Качество поверхности деталей характеризуется микро- и макрогеометрией поверхности, волнистостью, структурой, упрочнением и остаточными напряжениями. Глубина поверхностного слоя и качество поверхности зависят от основного материала, вида обработки, основных параметров инструмента, режима обработки и рода смазочно-охлаждающей жидкости.

Поверхностный слой неоднороден по строению (рис. 1.14). Граничный слой *1* состоит из адсорбированной пленки газов, влаги и смазочно-охлаждающей жидкости, которую можно удалить лишь нагревом детали в вакууме. Слой *2* — деформированный, сильно раздробленный металл с искаженной решеткой кристаллов и с обезуглероженными под действием высоких температур при шлифовании участками; в нем находятся окислы и нитриды, пустоты, надрывы и трещины. Слой *3* состоит из зерен, сильно деформированных под действием давления шлифовального круга и тангенциальных сил при шлифовании; в нем содержится структурно свободный цементит, образовавшийся под действием высоких температур. Слой *4* — металл с исходной структурой.

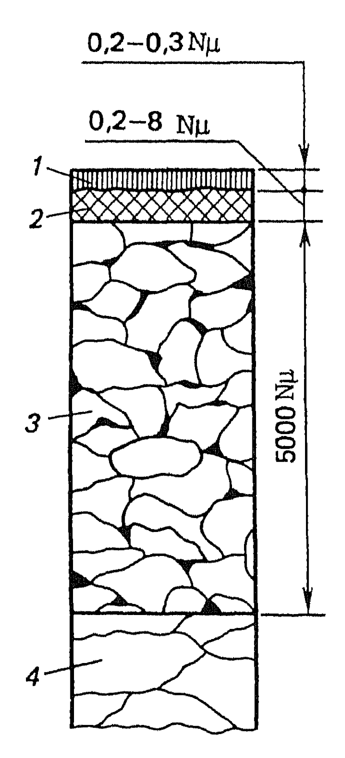


Рис. 1.14. **Структура поверхностного слоя шлифованной детали из углеродистой стали**

При более тонкой обработке (абразивными брусками, лентами и т. д.) слой *1* не изменяется по толщине, а слои 2 и *3* уменьшаются соответственно меньшим давлению и температуре поверхности при обработке.

У полированного металла самый верхний слой состоит из мельчайших кристаллических образований, многие из которых не имеют законченной решетки и представляют собой как бы обломки правильных кристаллических образований. Такое строение позволило считать этот слой аморф-

ным. Под ним находится слой очень мелких кристаллов, ориентированных в направлении полирования. Далее следует переходная к исходной структуре прослойка слабо наклепанных кристаллов без выраженной текстуры.

Если исключить адсорбированную пленку, то поверхностный слой обработанной инструментом поверхности состоит из наружного очень тонкого слоя, более или менее сильно разрушенных кристаллических зерен и наклепанного слоя четкой кристаллической структуры.

Упрочнение поверхностного слоя при обработке можно оценить по изменению микротвердости по сравнению с исходной. Микротвердость падает по мере удаления от поверхности детали, причем более резко по толщине слоя с раздробленной структурой (рис. 1.15). Прочные и хрупкие металлы менее склонны к упрочнению, чем малопрочные и вязкие. К тому же температура при резании высокопрочных металлов значительно выше, и сильнее сказывается фактор разупрочнения. Наклеп металла под выступами неровностей обычно больше, чем под впадинами. Поверхностный слой в зависимости от указанных выше обстоятельств имеет толщину при точении 0,25...2,0 мм, при шлифовании 12—75 мкм, при тонком шлифовании 2...25 мкм, при полировании 0,2 мкм.[3].

Следует иметь в виду, что шлифовочные прижоги могут достигать глубины 5 мм.

Поверхностный слой может находиться в напряженном состоянии. Остаточные напряжения в нем при механической обработке могут достигать 560...1000 МПа и быть как сжимающими, так и растягивающими. Шлифовочные трещины возникают под действием высоких внутренних растягивающих напряжений. Остаточные растягивающие напряжения снижают предел выносливости детали. Для иллюстрации влияния режима обработки на остаточные напряжения приводим некоторые результаты исследования А.А. Сухопарова на отожженной стали 45. Чистовое точение производилось проходным твердосплавным резцом без охлаждения. При продольной подаче 0,1 мм остаточное напряжение у наружной поверхности при скорости резания 100 м/мин составляло 70 МПа, при 200 м/мин — 0, а при 400 м/мин оно оказалось сжимающим и равным 166 МПа.

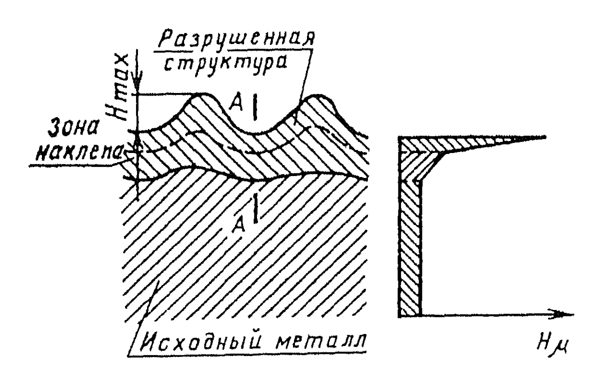


Рис. 1.15. **Схема распределения наклепа ($И_\mu$) обработанного изделия и твердости в сечении *А—А***

Микроскопическая неоднородность физико-механических свойств характерна для всякого твердого тела. В металлах она обязана анизотропии кристаллов. Обработанная поверхность в связи с особенностями ее образования отличается несравненно большей неоднородностью как по химической активности, так и физико-механическим свойствам. Кроме того, она имеет много микроскопических дефектов в виде трещин и пустот. Хотя подобные дефекты структуры возникают в процессе образования всей массы металла, но количество их в поверхностном слое возрастает в результате механических и тепловых воздействий при обработке.

Дефекты структуры могут иметь и атомный характер. Атомы кристаллической решетки металла непрерывно совершают беспорядочные колебания около положения равновесия с тем большим размахом, чем выше температура. Для некоторых атомов этот размах может стать настолько значительным, что атомы покинут свои места в решетке, нарушив тем самым кристаллический порядок. При любой температуре всегда имеется некоторое количество атомов, покинувших свои устойчивые положения в решетке, оставив в ней пустые места. Эти "дырки" являются дефектами строения твердого тела, ослабляющими его прочность. Образование дефектов в структуре может быть также обязано посторонним примесям в металле.

Система дефектов — слабых мест поверхности детали — является основой, на которой, начиная с самых малых деформаций, развиваются микротрещины. Вследствие наличия на поверхности дефектных мест естественно ожидать, что разрушение поверхности при трении будет происходить именно в этих местах, т. е. процесс изнашивания будет носить избирательный характер. По мере износа поверхности слабые места будут возникать вновь.

7. Пластическая деформация поверхностного слоя

Давно установлено несоответствие между реальной прочностью кристалла и теоретической, рассчитанной на основании оценки сил взаимодействия между атомами кристаллической решетки. Это несоответствие является следствием наличия в реальных кристаллах дефектов. Различают точечные, линейные, поверхностные и трехмерные дефекты кристаллов.

Точечные дефекты — малые несовершенства во всех направлениях — возникают вследствие наличия в кристалле атомов примесей (рис. 1.16, *а)* или образования вакансий (рис. 1.16, *б)*, т. е. пустых мест в узлах кристаллической решетки, не занятых атомами. Линейными являются несовершенства, малые в двух измерениях и относительно протяженные в третьем направлении. Поверхностные несовершенства являются малыми лишь в одном направлении и значительными в двух других измерениях (границы зерен, двойники, межфазные границы, поверхность кристалла). Трехмерные несовершенства — объемные (пустоты, включения второй фазы и т. д.).

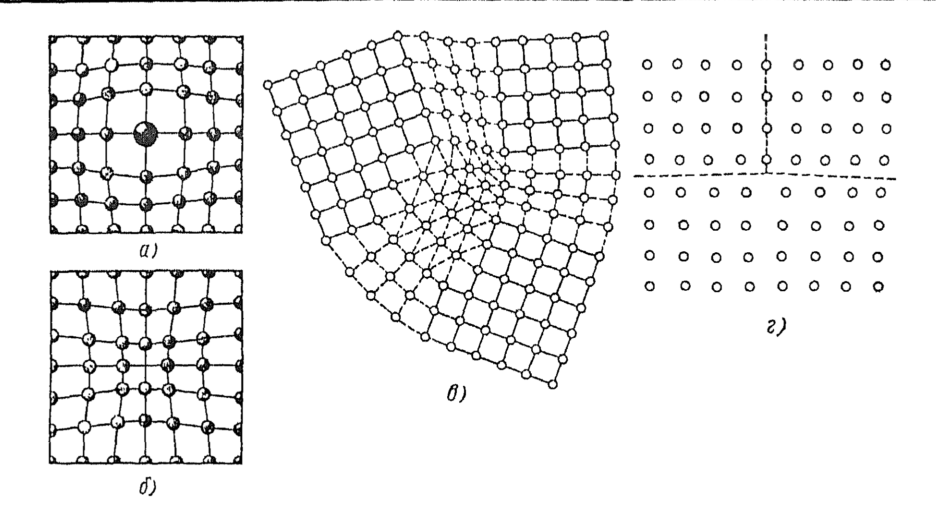


Рис. 1.16. **Дефекты кристаллической решетки**

Кристаллы металлов обычно состоят из большого числа областей размером около 1 мкм, расположенных под углом в десятые доли градуса. Эти области с правильной упаковкой атомов называются блоками.

На границе между блоками упаковка атомов искажена (рис. 1.16, *в*). К линейным несовершенствам относят дислокации (вклинивание) лишних или недостроенных кристаллических плоскостей (рис. 1.16, *г*).

Эти несовершенства в большой степени определяют механические свойства кристалла.

При теоретических расчетах прочности кристаллов обычно предполагают, что все атомы расположены в соответствии с кристаллической структурой. При таком строении пластическая деформация должна быть распределена по всему объему кристалла, так как все участки кристалла одинаковы. В результате можно было бы предполагать наличие одновременного скольжения параллельных плоскостей (подобно сдвигу в колоде карт). Все атомы участвовали бы в пластической деформации одновременно и оказывали бы большое сопротивление деформации.

Однако в реальных кристаллах скольжение происходит по кристаллографическим плоскостям, и пластическая деформация зарождается

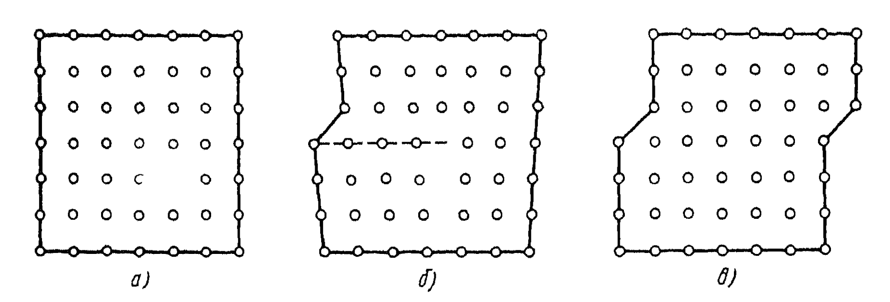


Рис. 1.17. **Схема пластической деформации по дислокационному механизму**

на небольших участках, постепенно распространяясь по всей плоскости. В каждый момент времени в скольжении участвует небольшое число атомов кристаллической решетки, в результате эффективность использования сил межатомных связей оказывается очень малой. На рис. 1.17. показан сдвиг реального кристалла. Перед началом скольжения кристалл имеет правильную форму решетки (рис. 1.17, *а)*. Под действием напряжения, приложенного к одной из сторон кристалла, образуется сдвиг, при этом в кристалле на границе зоны сдвига возникает линейное нарушение расположения атомов, названное Тейлором дислокацией (рис. 1.17, б). Дальнейшее распространение сдвига можно представить как передвижение дислокации через весь кристалл.

При выходе дислокации на другую сторону кристалла правильность строения кристаллической решетки восстанавливается, но одна половина кристалла оказывается сдвинутой по отношению к другой на одно межатомное расстояние (рис. 1.17, в). Произошел элементарный сдвиг в кристалле. Вокруг дислокации создается поле напряжений. При пластической деформации нарушается правильность кристаллической решетки, и вследствие этого дальнейшее скольжение затрудняется. Начинается скольжение по другой плоскости и т. д.

Описанная картина относится к скольжению в одном зерне. В реальном металле каждое зерно окружено другими зернами, которые деформируются неоднородно. В пределах каждого зерна действующие системы скольжения меняются от одного участка к другому. В отдельных случаях линии скольжения распространяются от одного зерна к другому.

Картины по обе стороны границы часто обнаруживают большое сходство (рис. 1.18).

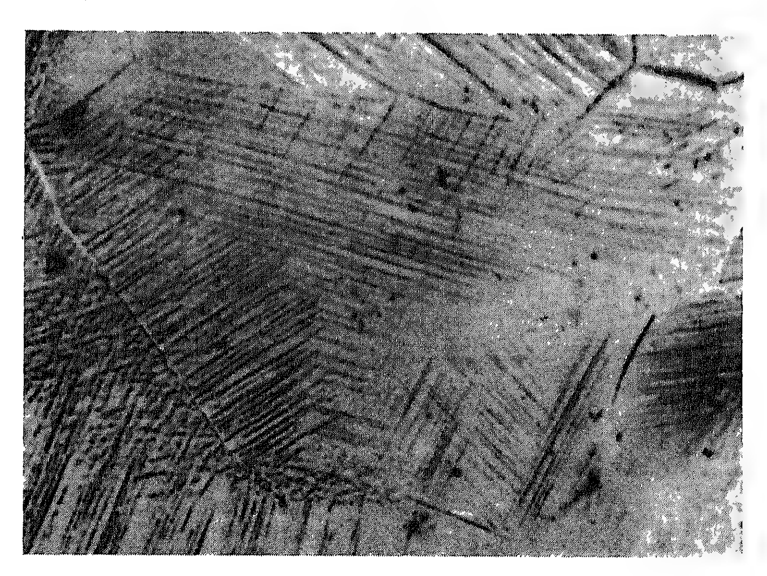


Рис. 1.18. **Линии сдвига в поликристаллическом образце алюминия высокой чистоты, растянутом на несколько процентов**

Поскольку присутствие в кристаллической решетке подвижных дислокаций в большой степени снижает прочность реальных металлов, наиболее действенным средством повышения прочности является создание бездислокационных или бездефектных металлов. В этом направлении достигнуты определенные результаты. Однако на практике для повышения прочности создают структуры материалов с большим количеством искажений кристаллической решетки, препятствующих движению дислокаций и способствующих увеличению числа мест, где одновременно развивается пластическая деформация. Такой путь увеличения прочности материала достигается легированием сплавов, химико-термической и механической обработкой.

Помимо механизма сдвиговой деформации известен также диффузионный механизм пластической деформации. В его основе лежат атомно-диффузионные перемещения. Интенсивность пластической деформации в этом случае зависит от подвижности диффундирующих атомов и может быть удовлетворительно описана экспоненциальной зависимостью от температуры.

На практике, особенно в условиях трения, оба механизма могут действовать одновременно, оказывая влияние друг на друга.

Глава **2.** **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ И КОНТАКТИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

1. Физико-химические свойства поверхностей деталей

Поверхностная энергия

Поверхностный слой металла обладает большой активностью. Это обусловлено тем, что внутри твердого тела каждый атом кристалла окружен другими атомами и связан с ними прочно по всем направлениям, а у атомов, расположенных на поверхности, с внешней стороны нет "соседей" в виде таких же атомов. Поэтому в поверхностном слое у атомов твердого тела остаются, как говорят, свободные связи, наличие которых создает вблизи поверхности атомное (молекулярное) притяжение. Чтобы при таком несимметричном силовом поле атом кристалла находился в равновесии, необходимо иное, чем внутри кристалла, расположение атомов самого верхнего слоя [7].

У кристалла, помещенного в жидкость или окруженного каким-либо твердым, телом, поверхностные атомы должны в некоторой степени перестроиться, так как атомы или молекулы внешней среды будут взаимодействовать с поверхностным слоем кристалла и уменьшать энергию связи поверхностных атомов. Если кристалл находится в воздухе или другом газе, то силами притяжения молекул газа к твердому телу пренебрегают. Это справедливо как для кристаллических, так и для аморфных тел [7].

Поверхностные атомы вследствие свободных связей обладают большей энергией, нежели атомы внутри твердого тела. Избыток энергии, отнесенный к единице поверхности, называют удельной поверхностной энергией или просто поверхностной энергией. Полная энергия кристалла состоит из внутренней и поверхностной энергии. Последняя пропорциональна поверхности раздела фаз, поэтому особенно возрастает при диспергировании твердых тел. Она во многом определяет свойства высокодисперсных систем — коллоидов.

При соприкосновении двух тел поверхностная энергия исчезает и может выделиться в виде теплоты или затратиться на подстройку в кристаллической решетке одного кристалла к другому. Если поверхностную энергию данного кристалла обозначить U_n, а работу разрушения на создание новой поверхности $2S—U_s$, то $U_s = 2SU_n$, следовательно, $U_n = U_s/2S$.

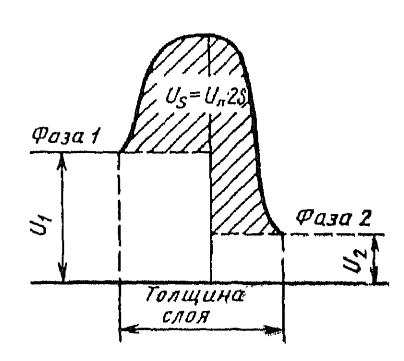


Рис. 2.1. **Сгущение энергии в поверхностном слое [7]**

Изобразим контакт S между фазами *1* и *2* (рис. 2.1). При энергии U_1 и U_2 энергия всей системы $U = U_1 + U_2 + U_nS$. Тогда

$$U_n = [U - (U_1 + U_2)]/S = U_s/S,$$

где U_s — сгущение энергии в поверхностном слое есть результат преимущественного действия более активной фазы [7].

Заметим, что разные грани кристаллов имеют разные U_n.

1.1. Адсорбция и хемосорбция

В результате взаимодействия ненасыщенных силовых полей твердого тела с силовыми полями молекул газа, движущихся к твердой поверхности, или взаимодействия жидкости, соприкасающейся с твердым телом, поверхность последнего покрывается пленкой веществ, содержащихся в окружающей среде: газов, паров воды, обычно находящихся в воздухе, и паров других жидкостей, а также веществ, растворенных в жидкостях и соприкасающихся с поверхностью твердого тела. Явление образования на поверхности последнего тончайших пленок газов, паров или растворенных веществ либо поглощение этих веществ поверхностью тела называют адсорбцией.

Наибольшей способностью к адсорбции обладают поверхностно-активные вещества, т. е. вещества, молекулы которых ориентируются при адсорбции перпендикулярно к поверхности (например, органические кислоты, их металлические мыла, спирты и смолы). Вода проявляет большую адсорбционную активность к резине и антифрикционным пластикам. Характерной особенностью поверхностно-активных веществ является несовпадение центров тяжести положительных и отрицательных зарядов в их молекулах даже в изолированном состоянии; иначе говоря, в их молекулах существует как бы два противоположных пространственно разделенных заряда. Такие молекулы, именуемые полярными, притягиваются и удерживаются поверхностью тела. Так, если поместить металлическое тело вблизи летучего вещества, например валерьяновой кислоты, то молекулы кислоты, испаряясь и диффундируя через воздух, покроют поверхность тела слоем толщиной в одну молекулу. Если металл привести в контакт с раствором жирной кислоты в поверхностно-активной жидкости (жирные кислоты с большим числом атомов углерода при нормальной температуре находятся в твердом состоянии), то молекулы кислоты вытеснят с поверхности раздела жидкости и твердой стенки молекулы растворителя и прикрепятся к металлу строго определенным образом [1].

Жирные одноосновные кислоты (пальметиновая, стеариновая и др.) — соединения с общей формулой RCOOH, где R — радикал вида C_nH_{2n+i}. Их молекулы, имеющие среднюю длину, в 5...10 раз превышающую их поперечное сечение, прикрепляются к поверхности металла стоймя своей карбоксильной группой COOH (рис. 2.2). Насыщенный адсорбционный монослой образуется, таким образом, из плотно расположенных молекул, ориентированных параллельно друг другу и перпендикулярно к поверхности тела. Такова же структура монослоя при адсорбции и других полярных молекул. Адсорбированные молекулы взаимодейству-

ют не только с поверхностью, но и между собой [1]. Взаимодействие между молекулами в тангенциальном к поверхности направлении называют продольной когезией. Сопротивление адсорбированной пленки продавливанию определяется силами продольной когезии.

Конец молекулы, присоединяющийся к металлу, подобен маленькому магниту; его называют полярным или активным. Остальная часть молекулы составляет так называемый хвост. У всех органических кислот и их мыл активной является карбоксильная группа, у спиртов— гидроксил OH, у других веществ— группа NH_2COCl и др.

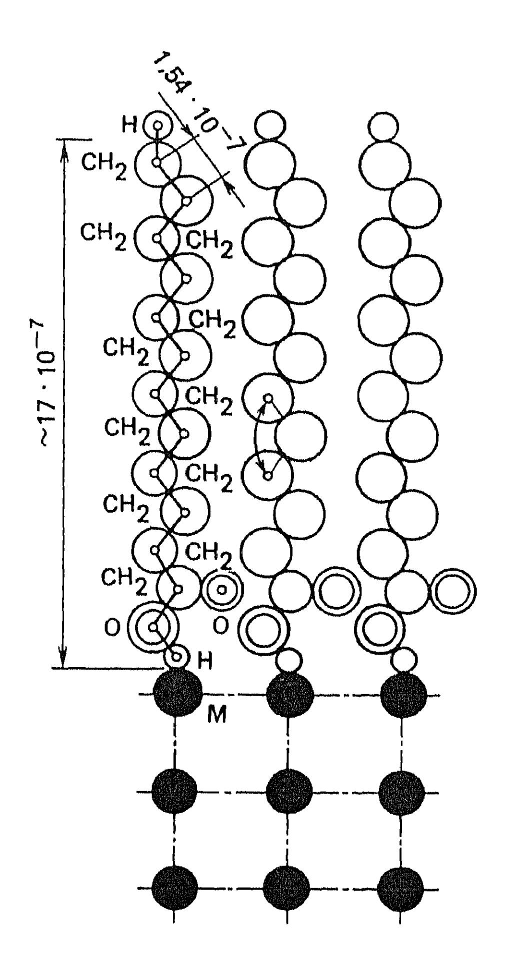


Рис. 2.2. **Схема расположения насыщенной молекулы жирной кислоты при сцеплении с решеткой металла (размеры в миллиметрах)**

Молекулы веществ, адсорбированных на поверхности твердого тела, обладают способностью перемещаться по поверхности из областей, где имеется их избыток, в места, где их недостаточно для полного покрытия поверхности. Подвижность адсорбированных молекул зависит от вида адсорбции. Адсорбция бывает физическая и химическая. При химической адсорбции (хемосорбции) полярные концы молекул, связываясь с поверхностью тела, образуют в ней монослой, сходный с химическим соединением. Подвижность молекул в результате этого сильно ограничивается.

Хемосорбция, в отличие от физической адсорбции, носит избирательный характер; она протекает с большой интенсивностью в местах нарушения регулярности кристаллической решетки (включениями либо "дырками"). Во многих случаях физическая и химическая адсорбция протекает одновременно, но одна из них является преобладающей. Так, имеются основания считать, что адсорбция жирных кислот на металлических поверхностях при нормальной температуре носит в основном физический характер, а при повышенной температуре — химический.

Силы взаимодействия между молекулами поверхностно-активных веществ и металлической подкладкой различны по природе и зависят как от природы веществ, так и от металла. Наиболее прочной связью облада-

ют молекулы с активной карбоксильной группой. Существование адсорбированного слоя определяется температурой.

Адсорбированный слой поверхностно-активных веществ является мономолекулярным. Искусственным путем можно образовать многомолекулярную пленку, в которой каждый слой будет состоять из одинаково ориентированных молекул. К металлу прикрепляются активные концы молекул первого ряда, к их хвостам хвосты молекул второго ряда, а к их активным концам концы молекул третьего ряда и т.д. Таким путем получали пленки в 1000 молекулярных слоев.

Большинство жидких сред с цепными молекулами, т. е. молекулами удлиненной формы, образуют на границе с металлической поверхностью особую структуру. Минеральные и растительные масла, а также соединения, входящие в состав животных жиров, являются представителями таких сред. Рентгеноструктурные и электроно-графические исследования показали, что даже масла, состоящие из углеводородов полнонасыщенных рядов C_nH_{2n} или C_nH_{2n+2}, имеющие неполярные молекулы (например, очищенное вазелиновое масло), образуют на металле тонкую пленку из отдельных слоев с ориентацией молекул в них перпендикулярно к поверхности металла.

Адсорбция в данном случае происходит под влиянием поляризации неактивных углеводородных молекул электрическим полем металлической поверхности. Однако в слоях встречаются незаполненные места. Прочность и устойчивость такой адсорбированной пленки мала. Достаточно, однако, в состав такого масла добавить незначительное количество (порядка 0,1 %) поверхностно-активного вещества, чтобы образовался адсорбированный монослой поверхностно-активных молекул (рис. 2.3), способный сообщить расположенным выше слоям масла ориентацию. Более того, добавление поверхностно-активного вещества к очищенному керосину — неполярной жидкости, не способной к ориен-

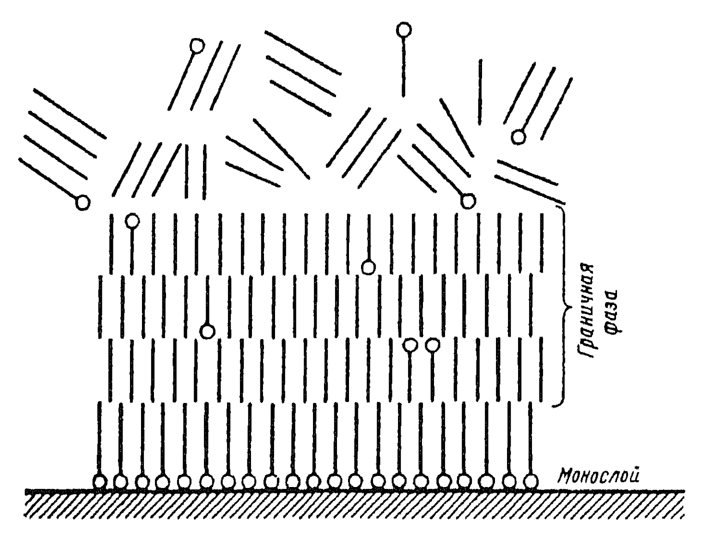


Рис. 2.3. **Влияние адсорбированного монослоя полярных молекул на ориентацию неполярных молекул растворителя**

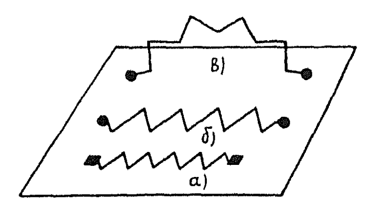


Рис. 2.4. Схема ориентации цепных молекул на плоскости:
а — молекула неполярного углеводорода; *б* — молекулы с неактивными центрами на полюсах; в — "мостообразная" форма ориентации; квадратики — концевые неполярные группы, например СНз; кружки — полярные группы

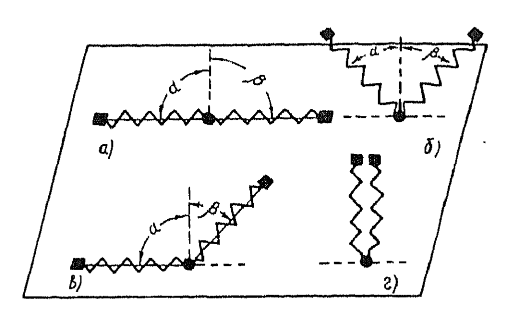


Рис. 2.5. **Возможные случаи расположения адсорбированной молекулы с одной полярной группой посередине углеродной цепи**

тации только под действием металлической подкладки, — создает эффект расслоения и ориентации. В смазочных маслах, имеющих поверхностно-активные вещества, тоже образуется на границе с поверхностью адсорбированный слой большей или меньшей прочности.

Итак, жидкости с молекулами большой длины, содержащие в растворе поверхностно-активные вещества, образуют над монослоем полярных молекул граничный слой, в котором молекулы расположены не беспорядочно, как в объеме жидкости, а правильно ориентированы. Граничные слои находятся в особом агрегатном состоянии, имея квазикристаллическую структуру, что дает основание говорить об особой фазе жидкости — граничной фазе. При некоторой температуре пленка квазикристаллической структуры как бы расплавляется: силы продольной когезии между молекулами исчезают, происходит дезориентация адсорбировавшихся молекул и теряется способность смазочного материала к адсорбции. Температура дезориентации на химически неактивных металлах для жирных кислот близка к температуре их плавления (40...80°С), а на химически активных металлах — к температуре плавления их металлических мыл (90...150°С).

Кроме описанного вида адсорбции цепных молекул с ориентацией, перпендикулярной поверхности твердого тела, существует другой вид адсорбции, когда оси цепных молекул лежат в плоскости, касательной к поверхности твердого тела. Такую "лежачую" ориентацию приобретают неполярные молекулы углеводородов; способны к ней и цепные молекулы с полярными группами на обоих своих концах, например, двухосновные жирные кислоты СООН—(CH_2)—СООН (рис. 2.4). Если карбоксильная группа расположена посередине цепной молекулы, то обе ветви цепи могут занимать различное положение относительно нормали к поверхности (рис. 2.5) [1]. Такую ориентацию имеют молекулы мыл жирных кислот и двухвалентных металлов.

1.2. Адсорбционный эффект понижения прочности (эффект Ребиндера)

Поверхностно-активная среда влияет на процессы деформации и разрушения твердых тел, значительно понижая их сопротивляемость деформированию и разрушению в результате физической (обратимой) адсорбции поверхностно-активных веществ их окружающей среды. Этот эффект был установлен П.А. Ребиндером и назван его именем. Различают внешний и внутренний адсорбционные эффекты. Внешний адсорбционный эффект происходит в результате адсорбции поверхностно-активных веществ на внешней поверхности деформируемого твердого тела, что вызывает пластифицирование поверхности и снижение предела текучести $\sigma_т$, а также коэффициента упрочнения $\lambda = d\sigma/d\varepsilon$, где σ — напряжение, ε — деформация (рис. 2.6).

При внешнем адсорбционном эффекте благодаря адсорбированию слоя поверхностно-активных веществ понижается поверхностная энергия твердого тела, что приводит к облегчению выхода дислокаций[13].

Молекулы органических кислот и спиртов относительно велики, они не могут проникнуть в трещины и вызывают внешний адсорбционный эффект. Эффект Ребиндера можно также продемонстрировать на примере продавливания стального шарика через сквозное цилиндрическое отверстие в металлическом образце (рис.2.7). При продавливании шарика избыточный поверхностный слой металла пластически деформируется, образуя наплыв перед шариком. При продавливании шарика без смазочного материала в зону деформации вовлекается значительно больше металла, чем в присутствии активной среды. На рис. 2.8. показана микроструктура металла в пластической волне при продавливании шарика. Силы продавливания при смазывании парафином в 3 раза меньше, чем в случае отсутствия смазочного материала [3].

Внутренний адсорбционный эффект вызывается адсорбцией поверхностно-активных веществ на внутренних поверхностях раздела — зародышевых микротрещинах разрушения, возникающих в процессе деформации твердого тела. Этот эффект заключается в адсорбции атомов поверхностно-активных веществ на поверхностях микротрещин при деформации разрушения и облегчения их развития в результате снижения работы образования новой поверхности.

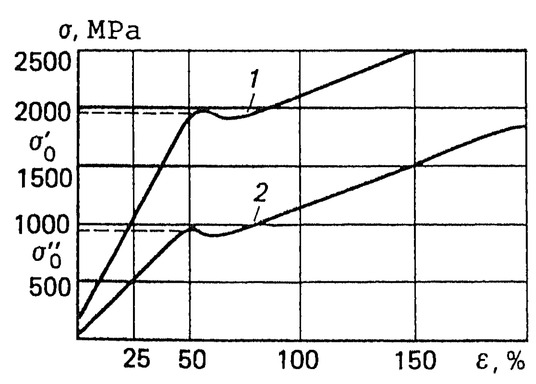


Рис. 2.6. **Зависимость напряжения σ от деформации ε монокристаллов олова:**
1 — в чистом вазелиновом масле; 2 — в 0,2%-ном растворе олеиновой кислоты в вазелиновом мале; σ_0 — предел текучести

Отличительной особенностью эффекта Ребиндера является то, что он проявляется только при совместном

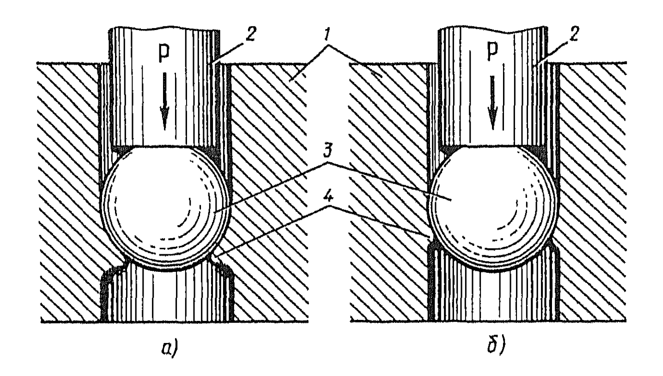


Рис. 2.7. **Наплыв металла при продавливании шарика без смазочного материала (а) и с окисленным парафином (б) (по данным П. А. Ребиндера) (×3):**
1 — образец; *2* — пуансон; *3* — шарик; *4* – наплыв

действии среды и определенного напряженного состояния. Речь идет об обратимом участии среды. Это принципиально отличает эффект Ребиндера от химических или электрохимических процессов, коррозии или растворения твердого тела в окружающей среде. Эффект может быть вызван не только адсорбцией, но и воздействием жидкости.

Наиболее сильно эффект Ребиндера проявляется в условиях образования новых поверхностей (in Statu nascenti), а также при наличии в твердом теле дефектов (в частности, границ зерен).

Поскольку адсорбция поверхностно-активных веществ уменьшает поверхностную энергию $U_п$, то можно проследить, как это отразится на уменьшении прочности твердого тела $\sigma_с$

В случае хрупкого разрушения может выполняться соотношение Гриффитса

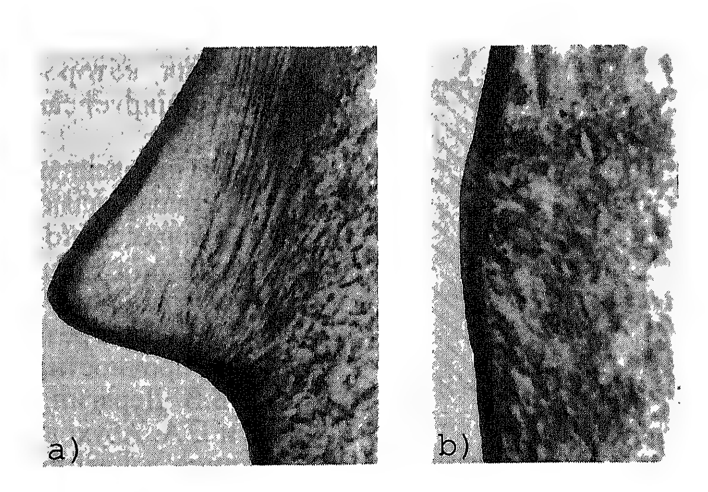


Рис. 2.8. **Микроструктура металла в пластической волне при вдавливании шарика без смазочного материала (а) и с окисленным парафином (б), ×30 (по данным П.А. Ребиндера)**

$$\sigma_c \sim (E/C)^{1/2}\, U_n^{1/2},$$

где E — модуль упругости; С — размеры дефекта (трещины).

При наличии пластической деформации в уравнение входит работа пластической деформации — энергия искажения ω в районе трещины:

$$U = U_n + \omega.$$

Значение ω может на несколько порядков превосходить истинное значение U_n. Однако ω симбатна U и резко снижается при понижении U_n. В этом и состоит природа охрупчивания твердого тела под влиянием поверхностно-активной среды [10].

Эффект Ребиндера и его закономерности распространяются на полимерные материалы. Адсорбируемые поверхностно-активные молекулы, стремясь покрыть всю поверхность тела в зоне соприкасания с активной средой, проникают в ультрамикроскопические трещины, мигрируя по их стенкам со скоростями, значительно превосходящими скорость всасывания жидкости в зазор. Когда активные молекулы достигают мест, где ширина зазора равна размеру одной-двух молекул (рис. 2.9.), адсорбционный слой своим давлением стремится расклинить трещину для дальнейшего их продвижения. Давление на стенки трещины у ее вершины может доходить до 10 ГПа.

Растягивающие напряжения, остаточные или от внешней нагрузки, раскрывают ультрамикротрещины и способствуют проявлению эффекта Ребиндера. Наоборот, при сжимающих напряжениях трещины замыкаются, может даже произойти "самозалечивание" их, и эффект может не проявиться. При упругой, а тем более при пластической деформации, в отдельных местах поверхности возникают трещины (щели) с незагрязненными стенками. Адсорбируясь по этим стенкам, активные молекулы производят расклинивающий эффект и усиливают деформацию. Последняя создает предпосылки для проявления расклинивающего действия, которое затем интенсифицирует саму деформацию.

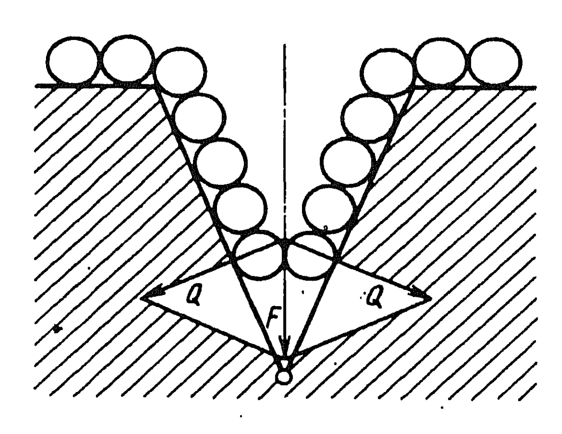


Рис. 2.9. **Схема адсорбционно-расклинивающего действия полярных молекул смазочного материала:**
F — давление адсорбированного слоя; Q — расклинивающие силы

Расплавленные легкоплавкие металлы являются сильными поверхностно-активными средами по отношению к более тугоплавким металлам и могут вызвать резкое понижение их прочности[13].

Б.В. Дерягин, М.М. Кусаков и Е.А. Абухов установили наличие давления на стенки микротрещины слоев жидкости, впитавшихся в нее, как в капилляр. Речь идет о жидкос-

тях с молекулами удлиненной формы. Давление на стенки расклинивает трещины, поэтому его называют расклинивающим. Оно может достигать 10...100 МПа. Подчеркнем, что адсорбционно-расклинивающий эффект проявляется у вершины трещины, расклинивающее же давление действует от ее устья до того пункта, куда продвинулась жидкость. За время деформации жидкость не может проникнуть далеко в глубь трещины (что не относится к эффекту Ребиндера), вследствие этого роль расклинивающего давления в процессе деформации невелика. Однако при снятии нагрузки оно тормозит смыкание микрощелей и может даже полностью предотвратить его, если молекулярные силы сцепления в области вершины щели недостаточны для вытеснения адсорбционного и граничного слоев [5].

Химически неагрессивные, но поверхностно-активные среды снижают, как установлено Г.В. Карпенко, предел выносливости материала по сравнению с его величиной в неактивной среде [9].

Эффект Ребиндера лежит также в основе облегчения резания пластичных тел (металлов) под влиянием поверхностно-активных компонентов смазочно-охлаждающих жидкостей [9, 3].

2. Пленки на металлических поверхностях

Практически все металлы подвергаются окислению. Металлические поверхности в процессе обработки очень быстро покрываются первичной окисной пленкой. Такие пленки обнаруживаются и на благородных металлах. Несмотря на малую толщину, пленка всего в несколько элементарных ячеек кристаллической решетки данной фазы окисла при нормальной температуре приостанавливает дальнейшее окисление. Разрушение поверхностей трения в среде воздуха тоже сопровождается их окислением.

Продуктами окисления могут быть твердые растворы кислорода в металле и их химические соединения. Так, железо при нормальной температуре растворяет около 0,05% кислорода, а при 1000°C 0,12%. Если окисление продолжается выше предела насыщения, то из раствора выпадают окислы. Железо с кислородом образуют три окисла, представляющие собой фазы в системе O_2—Fe с различным типом кристаллической решетки: вюстит FeO, магнетит Fe_3O_4 и гематит Fe_2O_3. Вюстит растворим в железе и устойчив при температурах выше 570°C; ниже этой температуры он распадается на магнетит и чистое железо $4FeO = Fe_3O_4 + Fe$. Магнетит и гематит устойчивы во всем диапазоне температур до точек плавления. Пленка на железе состоит из слоев, расположенных от поверхности внутрь в последовательности, соответствующей убыванию кислорода в окисле. При температуре ниже 570°C пленка может состоять из одного слоя Fe_3O_4, из наружного слоя Fe_2O_3 и следующего за ним слоя Fe_3O_4 или из слоев Fe_2O_3, Fe_3O_4 и FeO, причем распад FeO идет вслед за его образованием [12].

Скорость образования оксидной пленки на поверхности металла исчисляется долями секунды. Так, для возникновения слоя толщиной

1,4 нм достаточно 0,05 с. С увеличением толщины рост пленки замедляется [11].

Оксидная пленка находится в напряженном состоянии, испытывая растяжение или сжатие в зависимости от соотношения объемов основного металла и образовавшегося на его базе окисла. С увеличением толщины пленки возрастают силы упругости в самой пленке и на границе между пленкой и основным металлом. При некоторой толщине пленки происходит потеря ее устойчивости, наступают мгновенные смещения, и пленка приобретает пористое (рыхлое) строение [2].

Внешний слой поверхности состоит из загрязнений, попавших на поверхность при обработке, и адсорбированных газов и паров. Толщина этой пленки 0,1...2,5 нм. Расположенный под ним слой, возникающий под влиянием атмосферного кислорода, имеет на железе толщину до 5 нм, на стали примерно до 2 нм,на алюминии до 15 нм (по данным А.Д. Манасевича [11].

Толщина граничного смазочного слоя около 20 нм.

3. Взаимное контактирование деталей

Взаимное контактирование деталей происходит на выступах поверхностей на высотах, образованных микронеровностями. При изучении контакта деталей И. В. Крагельский (рис. 2.10.) выделил:

номинальную площадь контакта, соответствующую номинальным сопрягаемым размерам деталей;

фактическую (физическую) площадь контакта, равную сумме фактических малых площадок соприкасания;

контурную площадь касания, представляющую собой сумму площадок, ограниченных контурами, в которые вписаны области с близлежащими площадками фактического контакта [8].

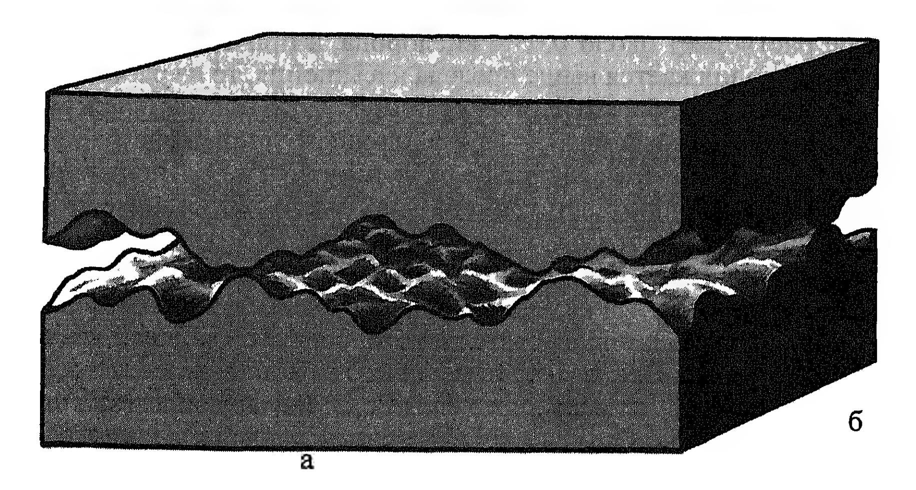


Рис. 2.10. **Схема контактирования деталей:**
а×б — номинальная площадь контакта

Контурные площадки легко обнаруживаются при проверке качества сопряжения деталей на краску — это пятно касания. Для плоских поверхностей, не имеющих отклонений от плоскостности, контурная площадь равна номинальной.

Процесс контактирования поверхностей при статическом нагружении протекает следующим образом. Поверхность воспринимает нагрузку вершинами выступов неровностей на высотах, образуемых макрогеометрическими отклонениями. Здесь располагаются зоны, из которых складывается контурная площадь касания. В контакт первыми вступают противостоящие друг другу на сопряженных поверхностях выступы, сумма высот которых наибольшая. Деформация неровностей и их основ вызывает сближение поверхностей. По мере повышения нагрузки сближение поверхностей увеличивается, и в контакт вступают пары выступов с меньшей суммой высот. Разновременность вхождения в контакт выступов, различающихся по высоте, дифференцирует их напряженное состояние и деформацию.

Возможны следующие виды деформации выступов: упругая; уругопластическая без упрочнения; упругопластическая с упрочнением. При первичном нагружении чисто упругая деформация неровностей возможна только у эластичных тел, например резины; упругая деформация превалирует при контактировании весьма гладких твердых металлических поверхностей. В большинстве случаев первичного нагружения пластической деформации принадлежит ведущая роль в формировании фактической площади контакта. Входящие в касание выступы пластически сплющиваются, чаще всего с внедрением: внедряется более твердый выступ или тот, которому геометрическая форма придает большее сопротивление деформации. Исследования К.В. Вотикова, А.П. Соколовского, Д.Н. Решетова, П.И. Бобрика и др. показали, что выступы поверхностей после однократного нагружения наклепываются и при повторных нагрузках, не превышающих первоначальную, деформируются вполне упруго.

Пластическая деформация выступов микронеровностей и их взаимное внедрение начинаются при среднем давлении на контакте, равном примерно утроенному пределу текучести материала. Предельное среднее давление на площадях фактического контакта с учетом упрочнения материала в процессах пластической деформации достигает двух-, трехкратного значения его твердости при вдавливании. При этом давлении материал под контурной площадкой, деформировавшийся до того упруго, начинает деформироваться пластически, в результате либо увеличиваются размеры площадки за счет частичного погружения находящихся в контакте выступов и поднятия других с вступлением их в контакт, либо возникают новые контурные площади контакта. Полное погружение выступов в пластически деформированную основу не наблюдается. После деформации, даже сильной, шероховатость поверхностей лишь несколько видоизменяется. Малые неровности пластически деформируются по своей высоте в той же пропорции, в какой пластически деформируется материал, лежащий под выступами (рис. 2.11). Аналогичное явление наблюдалось и у меди, подвергнутой сильному наклепу [14].

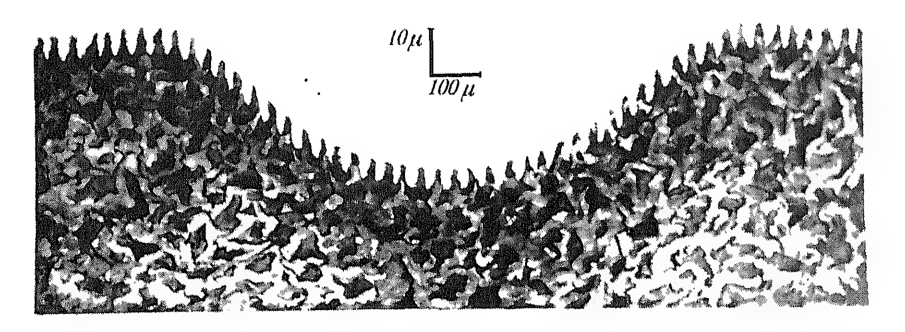


Рис. 2.11. **Косой срез глубокого отпечатка в отожженной меди, показывающий стойкость смятию неровностей поверхностей [14]**

Площадь фактического контакта поверхностей состоит из множества дискретных малых площадок, расположенных на различных высотах пятна касания в местах наиболее полного сближения поверхностей. Между площадками касания тел имеются соединенные между собой или закрытые микрополости, заполненные воздухом или другой газовой средой, смазочным материалом, продуктами износа и т.п.

Площадь фактического контакта зависит от микро- и макрогеометрии поверхностей, волнистости, физико-механических свойств поверхностного слоя и от нагрузки. При небольшой нагрузке ее рост сопровождается увеличением размеров площадок контакта. С дальнейшим ростом нагрузки увеличивается число площадок касания при сохранении размеров их почти неизменными. При снятии нагрузки в зависимости от ее величины исчезает 30...70% площадок контакта (по данным Н.Б. Демкина [4]).

Площадь фактического контакта составляет от одной десятитысячной до одной десятой номинальной площади касания. Даже при высоких нагрузках площадь фактического контакта не превышает 40% номинальной площади. Так, в случае контактирования стали по стали при нагрузке 15 МПа отношение площадей составляло 0,2 при обработке поверхности до *Ra* = 0,63...0,32 мкм и 0,35 при *Ra* = 2,5...1,25 мкм.

Площадь фактического контакта возрастает с увеличением удельной нагрузки, снижении шероховатости поверхности и росте радиуса закругления вершин ее неровностей; она несколько увеличивается при бóльшей длительности действия нагрузки. Эта площадь убывает с увеличением упругих характеристик, предела текучести материала и высоты неровностей поверхностей. Для поверхностей с грубой шероховатостью влияние различия в степени последней незначительно. При сопряжении двух различных материалов площадь фактического контакта определяется физико-механическими свойствами более мягкого материала и геометрией поверхности более твердого материала. При наличии между трущимися поверхностями тонкой квазиожиженной медной пленки, образуемой при трении в условиях режима избирательного переноса, площадь фактического контакта может увеличиться в 10...100 раз. Это является одной из причин резкого снижения интенсивности изнашивания трущихся поверхностей.

4. Взаимное внедрение поверхностей

До сих пор мы рассматривали касание поверхностей, погрешности которых обусловлены технологией обработки или износом. Между тем контактирование под нагрузкой поверхностей тел, из которых хотя бы одно поликристаллическое, а у другого однородная поверхность, связано с образованием шероховатости поверхности вследствие неоднородности деформации. Это означает, что будь поверхность с гетерогенной структурой даже идеально гладкой, она, как и сопряженная с ней поверхность, приобретает под нагрузкой шероховатость. Поясним причину.

Технические металлы состоят из большого числа кристаллитов разного состава, ориентировки и формы с линейными размерами обычно от 0,001 до 0,1 мм. Свойства кристаллита, как и монокристалла, отличаются четко выраженной анизотропией, в то время как поликристаллу, у которого любая ориентировка составляющих малых кристалликов равновероятна, свойственна изотропность как результат статистической устойчивости свойств для всех направлений. У монокристалла константы упругости и предел упругости зависят от направления растягивающей силы. Так, модуль продольной упругости E монокристалла железа изменяется от 284 до 132 ГПа, тогда как для поликристалла $E = 210$ ГПа, для монокристалла цинка $E_{max} = 123,6$ и $E_{min} = 34,3$ ГПа.

Если поликристаллическому чистому металлу свойственна неоднородность кристаллического строения, то большинство сплавов обладают также неоднородностью различных структурных составляющих по твердости и имеют разную ориентировку кристаллических зерен, выходящих на поверхность. В результате на отдельных площадках фактического контакта, начиная с малых нагрузок, происходит взаимное внедрение твердых составляющих и кристаллов, обращенных к поверхности "сильными" гранями, в менее твердые структурные составляющие и "слабые" грани кристаллов. Взаимное внедрение поверхностей твердых тел впервые экспериментально показал Л.В. Елин [6].

На рис. 2.12 и 2.13. показано сечение сжатых пластин с первоначально гладкими сопряженными поверхностями; стальную поверхность обрабатывали шлифовальной шкуркой, а поверхность баббита полировали. Как видно, баббит заполнил впадины между выступами стальной поверхности; его микрогеометрия в контакте претерпела значительные изменения. Интересно отметить, что такие же образцы с полированными сопряженными плоскостями под давлением 980 кПа не показали взаимного внедрения металлов.

Неоднородность металла, вызванная всевозможными включениями, сегрегацией примесей, трещинами, остаточными напряжениями и т. п., благоприятствует взаимному внедрению поверхностей. Так, в серых чугунах полости, заполненные графитом, являются преимущественно областями взаимного внедрения.

Для изнашивания поверхностей трения имеет значение не сам факт изменения их шероховатости, обусловленный неоднородностями строения металлов, а связанное с ним взаимное внедрение поверхностей. Глу-

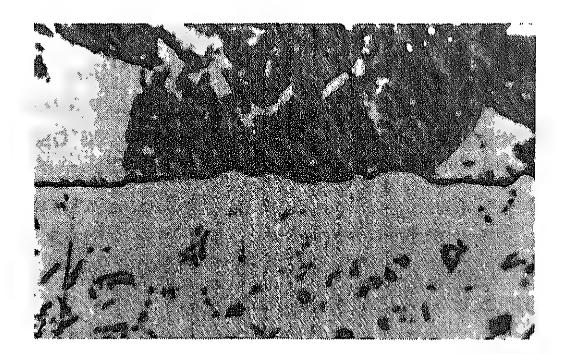


Рис. 2.12. **Участок сечения поверхности соприкосновения стали (вверху) и баббита при сжатии под давлением 2950 кПа, ×300 (по данным Л.В. Елина)**

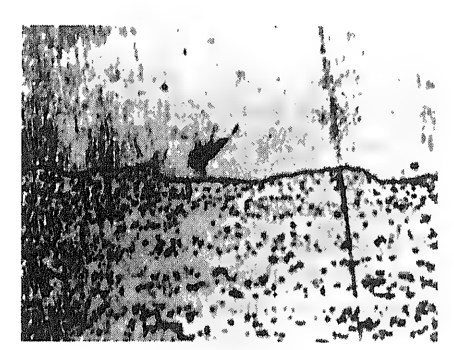


Рис. 2.13. **Участок сечения поверхности соприкосновения стали (вверху) и латуни при сжатии, ×300 (по данным Л.В. Елина)**

бина взаимного внедрения зависит от физико-механических свойств материалов, шероховатости поверхностей и нагрузки. Если исключить взаимное внедрение выступов микронеровностей поверхностей, упрочненных в результате обработки, то при малых нагрузках взаимное внедрение незначительно по глубине и носит в основном упругий характер. Представление о малости нагрузки следует привести в соответствие с механическими характеристиками материалов.

Возможно также взаимное внедрение поверхностей при контактировании металла с неметаллом и неметаллов, т. е. неоднородность строения свойственна всем материалам, в том числе и аморфным.

Глава 3. ВИДЫ ТРЕНИЯ В УЗЛАХ МАШИН

1. Общие аспекты

По характеру относительного движения различают трение скольжения и трение качения. Иногда оба вида трения проявляются совместно, когда качение сопровождается проскальзыванием, например, в зубчатых и зубчато-винтовых передачах или между колесами и рельсами.

В зависимости от того, является ли относительное перемещение соприкасающихся пар макро- или микросмещением, различают силу трения движения, неполную силу трения покоя, наибольшую силу трения покоя. Сила здесь разумеется в обобщенном понятии и может выступать как момент сил.

Сила трения движения — сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленной к общей границе между этими телами.

Наибольшая сила трения покоя — сила предельного сопротивления относительному перемещению соприкасающихся тел без нарушения связи между ними и при отсутствии смещения на контакте. Приложенная к одному из тел параллельно плоскости касания сила, превышающая хотя бы на бесконечно малую величину силу трения покоя, уже нарушает равновесие.

Неполная сила трения покоя — сила сопротивления, направленная противоположно сдвигающему усилию, при отсутствии смещения на контакте. Она изменяется от нуля (при отсутствии сил, стремящихся нарушить относительный покой тел в плоскости их касания) до наибольшего значения, когда она переходит в силу трения покоя.

Деформация тел, в первую очередь неровностей их поверхностей, под действием сдвигающего усилия и противоположной ему неполной силы трения покоя вызывает предварительное смещение тел, предшествующее их относительному макроперемещению. Это впервые установил А.В. Верховский[3]. Предварительное смещение мало́ по величине и пропорционально приложенной сдвигающей силе. Оно частично обратимо, т.е. после удаления сдвигающей силы происходит частичное обратное смещение. На площадках фактического контакта предварительное смещение равно нулю.

В зависимости от наличия смазочного материала различают следующие виды трения: трение без смазочного материала и трение со смазочным материалом.

2. Трение без смазочного материала

Трение без смазочного материала и при отсутствии загрязнений между трущимися поверхностями бывает в тормозах, фрикционных передачах, в узлах машин текстильной, пищевой, химической промышленности, где смазочный материал во избежание порчи продукции либо по соображениям безопасности недопустим, а также в узлах машин, работающих в условиях высоких температур, когда любой смазочный материал не пригоден.

Трение имеет молекулярно-механическую природу [6]. На площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях, в десятки раз превышающих межатомное расстояние в кристаллических решетках, и увеличиваются с повышением температуры. Молекулярные силы при наличии либо отсутствии промежуточной вязкой прослойки (влаги, загрязнения, смазочного материала и т. п.) вызывают на том или ином числе участков адгезию. Она возможна между металлами и пленками окислов. Адгезия может быть обусловлена одновременно и действием электростатических сил. Силы адгезии, как и молекулярные силы, прямо пропорциональны площади фактического контакта. Приложенное давление влияет на эти силы косвенно, через площадь фактического контакта [7].

Молекулярные силы как силы, перпендикулярные поверхности, казалось бы, не должны производить работу при относительном тангенциальном перемещении поверхностей. То же должно относиться и к силам адгезии, если образовавшаяся вследствие адгезии связь между телами разрушается по месту соединения. На самом же деле относительное смещение поверхностей при наличии взаимного притяжения и адгезии сопровождается деформацией сдвига, что вследствие неидеальной упругости материала требует затраты энергии в необратимой форме. Разумеется, бóльшую тангенциальную силу надо приложить, если связь между телами нарушается не по месту соединения, а на некоторой глубине от поверхности.

Более сильным проявлением молекулярных сил является схватывание поверхностей (см. гл. 11). Сила трения в этом случае зависит от протяженности зон схватывания и сопротивления их разобщению.

Сила трения T обусловлена механическим и молекулярным взаимодействиями:

$$T = aS_{ф} + bP \tag{3.1}$$

где a — средняя интенсивность молекулярной составляющей силы трения; $S_{ф}$ — фактическая площадь контакта; b — коэффициент, характеризующий механическую составляющую силы трения; P — сила давления.

Коэффициент трения f представляет собой отношение силы трения к силе давления. На основании формулы (3.1) имеем

$$\mathrm{f} = \mathrm{aS_{ф}}/P + b. \tag{3.2}$$

Двучленные выражения вида (3.1) и (3.2) для силы трения и коэффициента трения действительны для трения со смазочным материалом и без него.

Многие исследователи (Хольм, Стренг, Льюис и др.) считают, что составляющая силы трения, обусловленная пластической деформацией (механическим взаимодействием) поверхностей, обычно весьма незначительна (всего несколько процентов от суммарной силы трения). Так, трение металлических поверхностей в вакууме сопровождается большим коэффициентом трения (больше единицы). Если же в вакуумную камеру впустить воздух, то за очень короткий промежуток времени коэффициент трения уменьшается в несколько раз. За это время кислород не в состоянии образовать пленку окисла, чтобы сгладить самые небольшие неровности поверхности трения или воспрепятствовать их взаимному внедрению.

На основании этого можно сделать вывод, что молекулярная составляющая силы трения является причиной высокого значения последней в вакууме. Заметим, что при трении качения молекулярная составляющая сравнительно мало влияет на трение.

Статическая сила трения в зависимости от продолжительности неподвижного контакта возрастает до некоторого предела. Сила трения движения зависит от скорости скольжения поверхностей, причем соответственно давлению и твердости сопряженных тел коэффициент трения может монотонно возрастать, убывать, переходить через максимум или минимум.

Трение без смазочного материала сопровождается скачкообразным скольжением поверхностей, с чем связаны, например, вибрация автомобиля при включении сцепления, "дергание" при торможении, "визг" тормозов, вибрация резцов при резании и нарушение плавности работы медленно движущихся деталей. Можно указать некоторые мероприятия борьбы со "скачками" при трении — увеличение жесткости системы, повышение скорости скольжения, подбор пар трения, для которых коэффициент трения незначительно возрастает с ростом продолжительности неподвижного контакта и при повышении скорости через минимум не проходит [6].

Пленки окислов, влага и загрязнения на металлических поверхностях влияют на коэффициент трения двояко. Силы молекулярного притяжения между ними могут быть в сотни раз меньше, чем в случае взаимодействия металла на чистом контакте. Кроме того, прочность окислов обычно меньше прочности основного металла, поэтому сопротивление "пропахиванию" и срезанию частиц при перемещении, наряду с силами молекулярного взаимодействия, значительно понижается, и коэффициент трения падает. Толстые пленки окислов обладают меньшей твердостью, и наличие их приводит к повышению площади фактического контакта, причем, если это возрастание будет протекать быстрее, чем уменьшение механической составляющей силы трения, то произойдет увеличение силы трения.

Особо остановимся на трении металлических поверхностей при высоких температурах, выше температуры разложения минеральных масел, или температур плавления либо разложения твердых смазочных материалов. На поверхностях трения даже в условиях высокого разрежения образуется окисная пленка. Свойства этой пленки в отношении равномерности покрытия, плотности и прочности связи с основанием, а также интенсивность ее образования зависят от состава сплава. Пленка при соответствующем составе уменьшает силу трения и интенсивность изнашивания и предохраняет поверхности от коррозии и непосредственного контактирования. В разреженной атмосфере защитное действие пленки снижается.

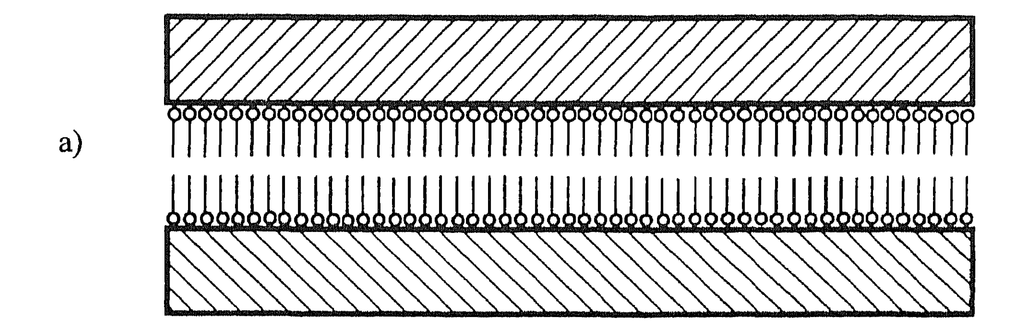
3. Трение при граничной смазке

При граничной смазке поверхности сопряженных тел разделены слоем смазочного материала весьма малой толщины (от толщины одной молекулы до 0,1 мкм). Наличие граничного слоя или граничной пленки снижает силы трения по сравнению с трением без смазочного материала в 2...10 раз и уменьшает износ сопряженных поверхностей в сотни раз.

Все масла способны адсорбироваться на металлической поверхности. Прочность пленки зависит от наличия в ней активных молекул, качества и количества последних. Хотя минеральные смазочные масла являются механической смесью неактивных углеводородов, они, за исключением неработавших сверхчистых масел, всегда имеют включения органических кислот, смол и других поверхностно-активных веществ. Жирные кислоты входят в состав масел растительно-животного происхождения, а также в состав пластичных смазочных материалов. Поэтому почти все смазочные масла образуют на металлических поверхностях граничную фазу квазикристаллической структуры толщиной до 0,1 мкм, обладающую более или менее прочной связью с поверхностью и продольной когезией. При наличии относительно толстой масляной прослойки между поверхностями трения переход от ориентированной структуры масла к неориентированной совершается скачком.

Молекулы смазочного материала ориентируются перпендикулярно к твердой поверхности (стоймя), что позволяет представить для наглядности граничную планку в виде ворса (рис. 3.1). При взаимном перемещении поверхностей трения "ворсинки" как бы изгибаются в противоположные стороны. На самом же деле происходит сдвиг с перекосом квазикристаллической структуры пленки. Сопротивление ее скольжению в таком состоянии несколько повышено. На восстановление ориентации молекул в прежнее положение перпендикулярно поверхности тел требуется некоторый промежуток времени, иногда относительно большой.

Смазочный материал в граничном слое анизотропен, в тангенциальном направлении молекулярные слои легко изгибаются и при толщине слоя больше некоторой критической величины скользят друг по другу; по нормали к твердой поверхности пленка обладает высоким со-

а)


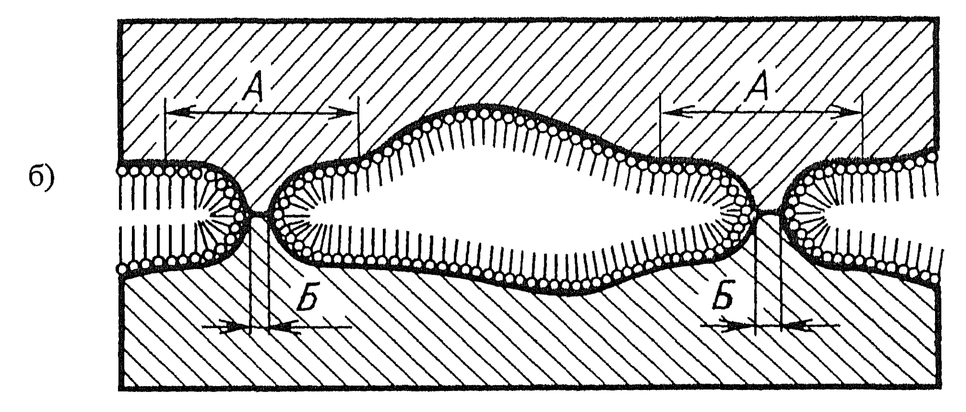
б)


Рис. 3.1. Схемы скольжения тел при граничной смазке:
о — смазка идеальных поверхностей; *б* — контактирование реальных поверхностей; *А* — участки, воспринимающие нагрузку; *Б* — участки непосредственного контактирования или контактирования при твердых пленках

противлением сжатию; ее несущая способность исчисляется десятками тысяч килограммов на 1 см^2. Деформация сжатия пленки в довольно высоком интервале не выходит за пределы упругости.

Механизм трения при граничной смазке представляется в следующем виде. Под нагрузкой протекает упругая в пластическая деформации на площадках контакта, под которыми здесь следует понимать площадки наиболее близкого прилегания поверхностей, покрытых граничной пленкой смазочного материала, вплоть до мономолекулярного слоя. На площадках контакта может произойти взаимное внедрение поверхностей без нарушения целостности смазочной пленки. Сопротивление движению при скольжении складывается из сопротивления сдвигу граничного слоя и сопротивления “пропахиванию” поверхностей внедрившимися объемами. Крòме того, на площадках контакта, подвергнутых наиболее значительной пластической деформации, и в пунктах с высокими местными температурами может произойти разрушение смазочной пленки с наступлением адгезии обнажившихся поверхностей и даже схватываниė металлов на микроучастках *Б* (см. рис. 3.1). Это вызывает дополнительное сопротивление движению.

Благодаря подвижности молекул смазочного материала на поверхности трения адсорбция протекает с большой скоростью, что сообщает смазочной пленке свойство “самозалечиваться” при местных ее повреждениях. Эта способность играет большую роль в предупреждении лавинного процесса схватывания.

Невозобновляемая граничная пленка по мере возрастания пути трения изнашивается, масло из пленки адсорбируется на продукты износа и уносится с поверхности трения; происходит сублимация пленки как твердого тела и удаление масла в атмосферу. Окисление пленки способствует дезориентации структуры и разрушению ее.

Вязкость масла не влияет на процесс граничной смазки. Масла с одинаковой вязкостью, но разных марок, имеют различное смазывающее действие. Для оценки поведения масел при граничной смазке еще в 1903 г. было введено понятие маслянистости и предложены различные формулировки этого понятия. *Маслянистость* — это комплекс свойств, обеспечивающих эффективную граничную смазку. Маслянистость оценивают в основном по коэффициенту трения: чем он меньше, тем выше маслянистость. Делаются попытки количественно оценить ее. Маслянистость характеризует действие смазочного материала применительно к данному сочетанию трущихся материалов.

В 1969 г. Б.В. Дерягин, М.М. Снитковский и А.Б. Ляшенко выдвинули гипотезу о том, что молекулы смазочного материала в граничном слое сгруппированы в домены. Домен олеиновой кислоты в граничном слое содержит около 1400 молекул. Домены формируются электромагнитными силами и как бы копируют кристаллическое строение подложки. Установлено, что граничные слои обладают свойствами полупроводникового элемента.

Добавление в граничные слои смазочного материала и водных растворов поверхностно-активных веществ повышает толщину граничного слоя и способствует уменьшению износа (до двух раз). При трении с граничной смазкой износ деталей машин велик. В силу волнистости и шероховатости поверхностей их контактирование происходит на очень малых участках трения; контактные давления имеют высокие значения, и тонкая граничная пленка масла не предохраняет поверхности от пластической деформации, что неизбежно ведет к износу деталей. Это является непреодолимым недостатком граничной смазки.

Эффективность смазочного действия помимо фактора адсорбции зависит от химического взаимодействия металла и смазочного материала. Жирные кислоты, вступая в реакцию с поверхностью металла, образуют мыла, т.е. металлические соли жирных кислот, способные вследствие свойственной им высокой когезии выдерживать без разрушения значительные деформации. Химическим явлениям принадлежит важная роль в организации смазывающего действия. Это подтверждает то обстоятельство, что инертные металлы и стекло плохо смазываются. Имеются косвенные основания считать, что между металлом и углеводородными маслами протекают реакции, способствующие более прочной связи пленки с основанием. Так, силиконовая жидкость, имеющая высокую вязкость,

но не являющаяся активной к металлу и не образующая поэтому защитной пленки на металлической поверхности, не могла быть использована в качестве смазочного материала в подшипниках скольжения.

Опыты со сталью 45 при скорости скольжения 4,5 м/с в среде воздуха и аргона при трении без смазочного материала (p = 1 МПа) и трении при граничной смазке (p = 3 МПа) показали, что после истирания первичной пленки интенсивность изнашивания в аргоне превышала более чем в 30 раз интенсивность изнашивания в воздухе, а при граничной смазке в 950 раз (данные Б.И. Костецкого). Эти и аналогичные им опыты убедительно свидетельствуют о значительном влиянии кислорода на процесс трения при граничной смазке. По этому вопросу имеется две концепции.

Как предполагает Б. Лунн [1], реакция между металлом и смазочным маслом с учетом роли окружающей среды протекает следующим образом: металл играет роль катализатора или кислородоносителя, вызывая окисление масла с образованием в дальнейшем прочно сцепляющихся с металлом соединений. Эти химические реакции протекают в местах с наибольшими давлением и температурой, т. е. в точках металлического контакта и особенно на низкоплавкой структурной составляющей, проявляющей более высокую химическую активность. По Г.В. Виноградову смазочное масло играет роль основного кислородоносителя, причем граничный слой образуется и восстанавливается по мере его изнашивания не на самой поверхности, а на субмикроскопической окисной пленке [4].

В связи с невысокой термической стойкостью граничной пленки, образуемой на металлических поверхностях обычными минеральными смазочными маслами, иногда прибегают к искусственному повышению ее химической активности. Этого достигают путем введения в масла специальных добавок (присадок), содержащих органические соединения серы, фосфора, хлора или сочетание этих элементов.

Вводят также мышьяк и сурьму. Хотя эти присадки и прочно адсорбируются на поверхностях трения, однако им отводится в процессе трения другая роль. В условиях высоких температур, развивающихся на микроконтактах, активное соединение присадок разлагается и, взаимодействуя с металлическими поверхностями, образует пленки сульфида железа, фосфита или фосфата железа, хлористого железа и окисленных хлоридов и т.п. Образовавшиеся пленки предотвращают металлический контакт, понижают сопротивление трению, препятствуют дальнейшему локальному повышению температуры. Пленка оказывает слабое сопротивление срезу, срабатывается и восстанавливается вновь.

Пленка, образуемая на поверхности стали хлорированными углеводородами, работоспособна до температуры 300...400°С. Выше этой температуры происходит плавление и (или) разложение. У сульфидов температура плавления выше и смазывающая способность сохраняется до температуры 800°С. Ниже критической температуры пленки ведут себя как твердые смазочные материалы.

Очевидно, действие присадок неэффективно, если металл не вступает в реакцию с активной частью присадки. Например, платина и серебро не вступают в реакцию с серой.

Некоторые твердые тела могут производить смазочное действие, организуя и поддерживая режим трения при граничной смазке.

Из предыдущего вытекает, что граничная пленка должна обладать высоким сопротивлением продавливанию и низким сопротивлением срезу. Исходя из таких требований, к твердым смазочным материалам можно отнести некоторые тела слоисто-решетчатой, пластинчатой структуры, мягкие металлы и тонкие пленки пластиков.

Из тел слоисто-решетчатой структуры свойствами, необходимыми для смазки металлических поверхностей, обладают графит, молибденит (дисульфид молибдена MoS_2), сульфид серебра, пористый свинец и дисульфид вольфрама. Остановимся на механизме смазочного действия графита и молибденита, который в общем аналогичен и для других тел подобной структуры.

В кристаллической решетке графита атомы углерода расположены в параллельных слоях, отстоящих один от другого (ближайшего) на расстоянии 0,34 нм, а в каждом слое они размещаются в вершинах правильных шестиугольников с длиной стороны 0,14 нм (рис. 3.2). Так как силы взаимного притяжения между атомами тем меньше, чем больше расстояние между ними, то связи между атомами в слоях значительно прочнее, чем между слоями. Поэтому при большом сопротивлении графита сжатию перпендикулярно слоям (плоскостям спайности) сопротивление срезу параллельно слоям мало́. Если учесть, что незакрепленные агрегаты пластинчатых кристаллов располагаются на металлической поверхности плоскостями спайности, то образовавшийся граничный слой из цепочек, нормальных к поверхности, обладает качествами (прочностью и сопротивлением деформации), характерными для граничных слоев, образованных смазочными маслами.

Твердость графита в направлении, перпендикулярном плоскости спайности, почти такая же, как у алмаза, что дает основание предположить, что соответствующим образом ориентированные частицы графита могут без разрушения внедриться в металлическую поверхность. По-видимому, вследствие этого, во всех случаях действенности смазки графитом металлический контакт поверхностей трения почти или совсем отсутствует; даже при значительной пластической деформации контактирующих поверхностных слоев сдвиги протекают под пленкой смазочного материала или внутри него. Слабое сопротивление графита срезу по плоскостям, параллельным плоскостям спайности, обусловливает при трении послойное скольжение в нанесенных на поверхностях пленках. Коэффициен-

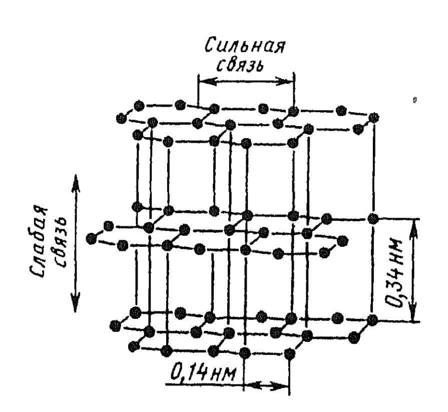


Рис. 3.2. **Кристаллическая структура графита. Слои плотно упакованных атомов углерода разделены большими расстояниями**

ты трения графитированных поверхностей могут достигнуть малых величин (0,03...0,04).

Приведенное описание не является полным. Некоторые факты не позволяют объяснить смазочное действие графита только слоистой структурой. Так, сила трения при смазке графитом в сухом воздухе выше, чем во влажном; сила трения в атмосфере азота существенно больше, чем на воздухе, причем в сухом азоте выше, чем во влажном; графит не обладает хорошей смазочной способностью в восстановительной среде смеси газов. Таким образом, наличие пленки влаги или окисных пленок является необходимым условием для проявления графитом его смазывающего действия. Влага и окисные пленки на металлических поверхностях, образованию которых способствует влага, улучшают адгезию графита к этим поверхностям, без чего прочность граничного слоя недостаточна.

Кристаллическая решетка дисульфида молибдена (рис. 3.3) подобна решетке графита: между атомами молибдена и серы имеются тесные связи, в то время как расстояние между слоями атомов серы относительно больше. Благодаря этому дисульфид молибдена можно использовать как смазочный материал как при низких температурах (до –50°С), так и в вакууме. При температуре 538°С молибденит превращается в триокись, являющуюся абразивом.

При наличии на поверхности молибденита влаги сила трения увеличивается. Предполагается, что водяной пар реагирует с атомами серы, что может вызвать коррозию стальной поверхности.

Кроме тел слоисто-решетчатой структуры, все остальные твердые смазочные материалы образуют граничный слой с необходимыми качествами по сопротивлению сжатию и сдвигу (срезу), но не имеющий строго ориентированной структуры. Поэтому формально можно было бы возразить против определения трения с твердым смазочным материалом как

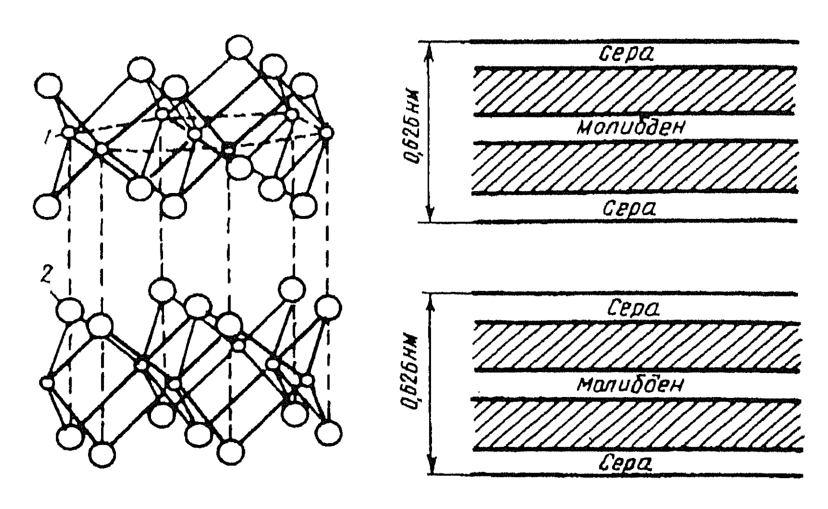


Рис. 3.3. **Структура дисульфида молибдена M_0S_2. Единичные пластинки состоят из чистого молибдена или из чистой серы, расстояние между ними 0,366 нм и связь относительно слабая:**

1 — атомы молибдена; *2* — атомы серы

трения при граничной смазке. Твердыми смазочными материалами могут быть мягкие металлы, имеющие низкое сопротивление срезу в полезном диапазоне рабочих температур. Для смазки используют твердые пленки свинца, олова и индия.

Механизм действия тонких металлических пленок, нанесенных на твердое основание, по Ф. П. Боудену таков: нагрузка воспринимается через пленку, которая, обладая достаточной прочностью против выдавливания, предохраняет трущиеся поверхности от непосредственного контактирования и взаимного внедрения. При относительном перемещении поверхностей происходит срез в мягком металле. Поскольку сопротивление срезу невелико, а площадь фактического контакта благодаря твердой подкладке мала, то и сопротивление трению также мало. Пленка, нанесенная на мягкую подкладку, значительно деформирующаяся под нагрузкой, вступает в контакт с сопряженной поверхностью на большей площади, что увеличивает силу трения. Поэтому нанесение пленок мягких металлов, к примеру, на оловянный баббит неэффективно; более целесообразно применять их на свинцовистой бронзе и на медных сплавах[2].

Из мягких металлов в качестве твердых смазочных материалов можно использовать только те, которые не наклепываются в пределах рабочих температур и не образуют хрупких твердых растворов с металлами сопряженных тел. Чтобы металл не наклепывался, его рабочая температура должна быть выше температуры рекристаллизации. У олова, свинца и индия температура рекристаллизации ниже нормальной. Вместе с тем олово, которое хорошо работает как твердый смазочный материал (например, между чугунными поверхностями), непригодно для нанесения на свинцовистую бронзу, так как оно диффундирует с поверхности в медную основу бронзы, образуя твердые, выкрашивающиеся из рабочей поверхности кристаллы. Индий хотя при нагреве и диффундирует в бронзу, соединяясь со свинцом, не образует хрупких соединений,

Нанесенные твердые пленки при многократных взаимных перемещениях поверхностей быстро изнашиваются. Вследствие этого их используют в качестве приработочного покрытия, а при однократном контактировании поверхностей — при глубокой вытяжке металлом.

Смазывание узлов трения металлом может быть осуществлено при использовании ИП. В этом случае сила трения может быть уменьшена в 10 раз, а износ полностью устранен. Здесь действуют иные силы и принципы: электрические силы, удерживающие пленку в зазоре, отсутствие микронеровностей поверхности, которые утапливаются в пленке, и др. Ошибочно полагать, что при смазывании узлов машин металлом углеводородный смазочный материал будет не нужен. Функции его изменяются: он служит в качестве транспорта подачи металла в зону трения, участвует в физико-химических процессах на поверхности контакта при образовании металлической пленки. Как и прежде, углеводородная составляющая смазочного материала охлаждает узлы трения и защищает их от коррозии. Эффект ИП по многим принципиальным признакам отличается от трения при граничной смазке, что позволяет характеризовать его как новый вид трения.

Некоторые материалы вследствие обычного металлургического процесса или искусственного пропитывания содержат вещества, способные служить твердым смазочным материалом; например, на приработанной поверхности конструкционного чугуна графит размазывается, образуя граничный слой. Такой же слой создается на поверхностях деталей из пористых антифрикционных материалов, пропитанных минеральными маслами, графитом и дисульфидом молибдена. В более широком понятии граничным смазочным материалом служит также политетрафторэтилен, когда им пропитывают пористые подшипниковые материалы. В свинцовистой бронзе, в твердой медной основе которой вкраплен свинец, последний при скольжении размазывается по поверхности, покрывая ее тонкой пленкой. Эта пленка по мере изнашивания сплава возобновляется. Дорожки качения и тела качения подшипника, работающего при температурах выше 300°С, покрывают иногда серебром для предохранения от окисления и для использования в качестве смазывающего материала.

4. Жидкостная, вязкопластическая и контактно-гидродинамическая смазка

Жидкостная смазка характеризуется тем, что трущиеся поверхности разделены слоем жидкого смазочного материала (масла), находящегося под давлением. Давление смазочного материала уравновешивает внешнюю нагрузку. Слой смазочного материала называют несущим слоем. При увеличении его толщины, более толщины граничной пленки, уменьшается степень влияния твердой поверхности на далеко отстоящие от нее молекулы масла. Слои, находящиеся на расстоянии более 0,5 мкм от поверхности, приобретают возможность свободно перемещаться один относительно другого. При жидкостной смазке сопротивление движению определяется внутренним трением (вязкостью) жидкости и складывается из сопротивления скольжению слоев масла по толщине смазочной прослойки. Этот режим трения со свойственными ему весьма малыми коэффициентами трения является оптимальным для узла трения с точки зрения потерь энергии, долговечности и износостойкости. Сила трения при жидкостной смазке не зависит от природы сопрягаемых поверхностей.

Явление трения при жидкостной смазке было открыто в 1883 г. Н. П. Петровым, создавшим основы гидродинамической теории смазки [8]. Современная гидродинамическая теория смазки, построенная на некоторых упрощающих предпосылках, дает руководящие материалы, позволяющие определить несущую способность масляного слоя и его минимальную толщину. Однако выводы теории относятся к абсолютно жестким, идеально гладким сопряженным деталям, выполненным и смонтированным достаточно точно, что требует внесения соответствующих коррективов.

Существует два способа создания давления в несущем слое. При первом способе специально предусмотренный насос создает гидростатическое

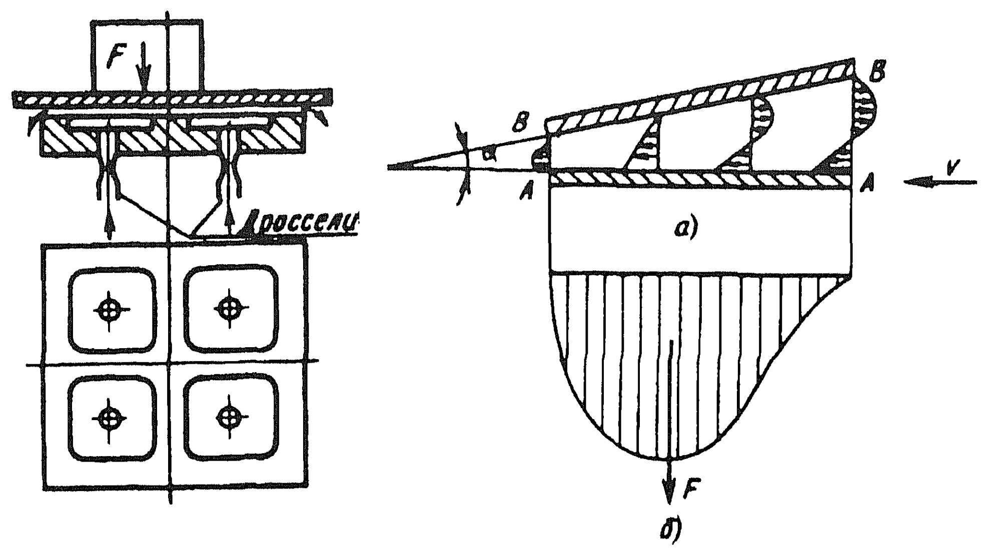


Рис. 3.4. **Схема работы гидростатической опоры**

Рис. 3.5. **Схема образования несущего слоя смазки**

давление, достаточное для разделения трущихся поверхностей (рис. 3.4.) Утечка масла через торцы подшипника компенсируется. соответствующей подачей насоса. При втором способе давление в смазочном слое развивается автоматически. Для этого необходимы надлежащие конструктивные мероприятия и подбор марки масла в зависимости от скорости скольжения.

Соответственно двум способам создания давления в несущем слое различают гидростатические и гидродинамические опоры скольжения. Как те, так и другие являются опорами трения при жидкостной смазке, но в силу большей распространенности гидродинамических опор в обиходе под жидкостной смазкой понимают гидродинамическую опору.

Механизм образования давления в несущем слое легче всего пояснить на примере плоской опоры (рис. 3.5, *а).* Пусть пластина *А—А* перемещается с некоторой скоростью v под углом α к неподвижной подкладке *В—В*. Промежуток между пластиной и подкладкой заполнен вязкой жидкостью. Слой жидкости, смачивающей пластину *А—А,* силами вязкого трения приводит в движение смежный с ним по высоте слой. Так движение будет передаваться от одного слоя к другому, за исключением слоя, смачивающего неподвижную под кладку *В—В.*

В итоге масло будет вовлекаться в сужающийся клиновой зазор и в нем будет поддерживаться давление. Оно не будет постоянным по длине, поскольку на входной и выходной кромках масло соприкасается с атмосферой и здесь избыточное давление равно нулю (рис. 3.5, б). Графики скоростей движения жидкости в зазоре показаны на рис. 3.5, *а.* Несущая способность или грузоподъемность смазочного слоя равна равнодействующей силе давления. Такой силой можно нагрузить пластину при данных ее размерах, скорости перемещения и вязкости масла.

Клиновой зазор является необходимым условием поддержания режима трения при жидкостной смазке в гидродинамической опоре. В плоских опорах клиновой зазор создается конструктивно, с помощью скосов поверхности, как это имеет место в ползунах и кольцевых опорах, либо благодаря самоустановке опорной поверхности (упорные подшипники типа подшипника Мичелла).

В опорном подшипнике скольжения диаметр отверстия больше диаметра цифры, в результате между цапфой и вкладышем образуется клиновой серповидный зазор. При вращении цапфы смазывающая жидкость вовлекается силами вязкости в сужающийся зазор, что приводит к повышению давления в слое жидкости. При достаточных вязкости смазочного материала и скорости на окружности цапфы в слое масла создается давление, необходимое для отделения цапфы от вкладыша — цапфа как бы всплывает на тонком слое масла. Центр цапфы смещается от начального положения. Давление в слое масла поддерживается насосным действием вращающейся цапфы.

Наличие повышенного давления в слое масла приводит к сложной картине течения жидкости. Часть жидкости, вовлекаемая в зазор, вытесняется через входное сечение в сторону, обратно направлению вращения, основной поток выносится из нагруженной зоны по вращению вала, а остальная часть вытекает через торцы подшипника.

На рис.3.6 показано положение цапфы в подшипнике при жидкостной смазке и приведены графики распределения давления в слое масла по поперечному сечению и по длине.

Для осуществления жидкостной смазки, очевидно, необходимо, чтобы наименьшая толщина смазочного слоя при гладких поверхностях и прочих идеальных условиях была не менее толщины, при которой проявляются объемные свойства жидкости. Для шероховатых поверхностей наименьшая толщина слоя — минимальное расстояние между вершина-

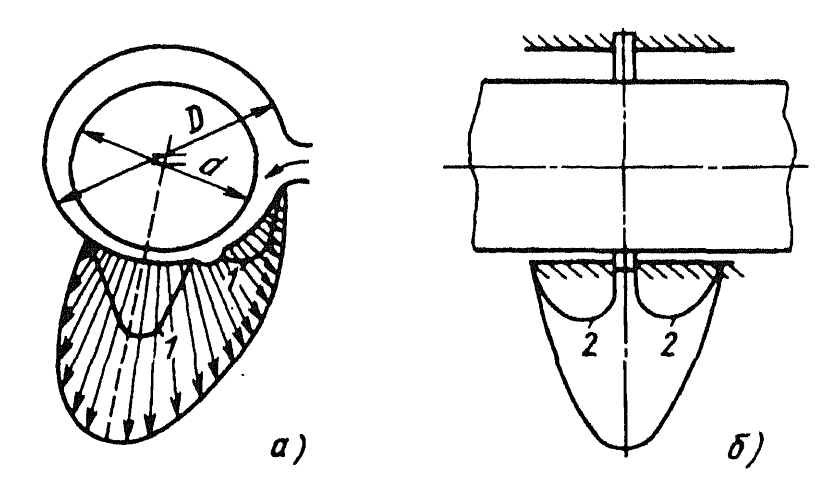


Рис. 3.6. **Распределение давления внутри масляного слоя подшипника:**
а — в поперечном сечении; б—в продольном сечении; *1* — при продольной канавке; *2* — при кольцевой канавке

ми выступов неровностей сопрягающихся поверхностей. Согласно прикладной гидродинамической теории смазки в качестве необходимого условия трения при жидкостной смазке минимальный зазор между поверхностями должен быть не менее суммы средних высот неровностей поверхностей. Такая концепция вытекает из представления, что выступы одной поверхности контактируют со впадинами сопряженной поверхности. Поэтому во избежание зацепления неровностей одно из тел трения должно "всплыть" не менее чем на сумму средних высот неровностей. При определении наименьшей допустимой (критической) толщины смазочного слоя учитывают также степень деформации под нагрузкой, погрешности изготовления и монтажа деталей и возможность присутствия твердых примесей в масле.

Явление трения при жидкостной смазке в целом сложнее, чем это следует из гидродинамической теории, охватывающей чисто механическую сторону процесса. Молекулы поверхностно-активных веществ, содержащихся в масле, адсорбируются на поверхности в мономолекулярный слой, на котором образуется граничный слой, к граничному слою примыкает зона микротурбулентного движения, за которой следует ламинарный поток масла (рис. 3.7).

Трение при жидкостной смазке возможно не только между скользящими поверхностями. При качении либо качении со скольжением цилиндрических и вообще криволинейных поверхностей в сужающийся со стороны входа в контакт зазор вовлекается смазочная жидкость, которая при некоторых условиях (нагрузке, скорости, упругих характеристиках и геометрии поверхностей) разделяет их своим слоем

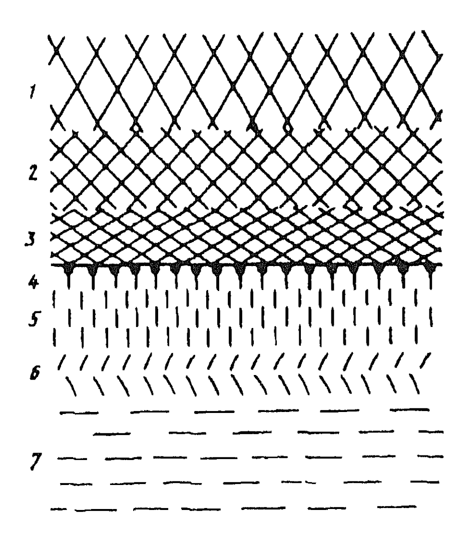


Рис. 3.7. **Схематический разрез металлической поверхности и слоя жидкого смазочного материала:**
1 — исходная структура металла; *3* — кристаллы, деформированные в направлении обработки; *3* — раздробленные размазанные кристаллы, окислы и адсорбированное масло; *4* — адсорбированный монослой масла; *5* — граничный слой масла; *6* — зона микротурбулентности; *7* — ламинарный поток

Пластичные смазочные материалы, как и жидкие, могут обеспечить режим трения, исключающий непосредственный контакт поверхностей и их взаимное внедрение. В отличие от масел, являющихся вязкими жидкостями, пластичные смазочные материалы обладают вязкопластическими свойствами. Поэтому поток такого материала имеет свои особенности.

Как установлено Н. В. Тябиным, в нем имеются зоны, в которых отсутствует послойное скольжение, течение в них происходит как в идеальной пластичной среде; вне этих зон течение вязкое [11]. Возможно также скольжение смазочного материала относительно стенок под-

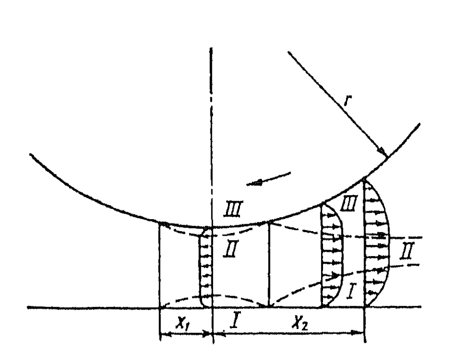


Рис. 3.8. **Эпюра распределения скоростей в вязкопластичном потоке при качении цилиндра по плоскости:**
x_1, x_2 — координаты концов смазочной прослойки

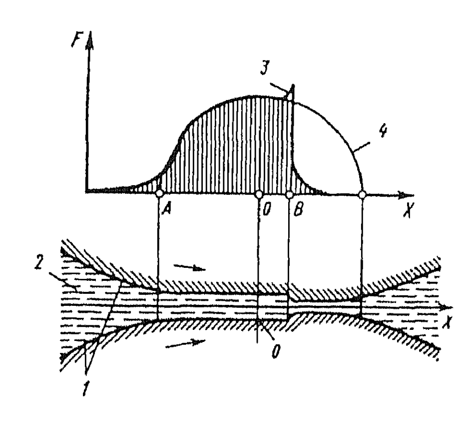


Рис. 3.9. **Форма зазора между контактирующими при качении цилиндрами и ориентировочный график распределения в нем давления масла:**
1 — контактирующие поверхности; *2* — масло', *3* — график давления масла; *4* — эллипс распределения давления по Герцу для несмазываемых поверхностей

шипника. При качении цилиндра по плоскости (рис. 3.8) в зонах *I* и *III* градиент скорости по высоте отличен от нуля и течение вязкое. В зоне *II* касательное напряжение меньше предельного напряжения сдвига, взаимное послойное перемещение в каждом сечении этой зоны отсутствует, и поток подобен течению пластического тела.

При качении или при качении со скольжением масло втягивается в зону контакта движущимися поверхностями. При некоторых условиях, аналогичных условиям возникновения гидродинамической смазки между скользящими поверхностями, в масляном слое образуется подъемная сила. Вследствие малой протяженности зоны контакта и больших давлений в ней масляный слой имеет толщину того же порядка, что и местные деформации контактирующихся тел. Эти деформации влияют на конфигурацию зазора. Задача о распределении давления в слое смазочного материала в зоне контакта упругих тел является контактно-гидродинамической.

Контактно-гидродинамическая теория смазки разрабатывалась А.М. Эртелем, А.И. Петрусевичем, А.Н. Грубиньм, М.В. Коровчинским, Д.С. Кодниром [5, 9] и др.

На рис. 3.9 представлена примерная форма зазора и ориентировочный график давления для катящихся друг по другу под нагрузкой цилиндров при наличии между ними разделяющего масляного слоя. Точка *А* — начало контакта на площадке касания несмазанных цилиндров. Перед контактом в масляном клине возникает давление, которое постепенно повышается и в некоторой области контакта распределяется, как и при трении без смазочного материала. В точке *В*, лежащей в задней половине контакта, зазор сужается и возникает пик давления. Место расположения

пика зависит от нагрузки, вязкости масла, скорости качения и др. По А.И. Петрусевичу пиковое давление несколько меньше наибольшего давления в центре площадки контакта. По его же исследованиям для образования пикового давления необходимо, чтобы давление в контакте было не ниже 200...300 МПа.

В первом приближении динамическая вязкость масла

$$\eta = \eta_0 e^{p \quad c - b\Theta}$$

где η_0 — вязкость масла при атмосферном давлении и температуре окружающей среды; p — давление в слое масла; c — пьезокоэффициент; b — температурный коэффициент вязкости; Θ — превышение температуры в слое масла над температурой окружающей среды.

Повышение давления и температуры оказывает противоположное действие на вязкость масел. При малом температурном коэффициенте вязкости или при умеренной температуре вязкость масла в контакте может быть весьма значительной, и, вероятно, масло пребывает в квазипластичном состоянии.

При качении со скольжением условия для образования жидкостной смазки более благоприятны, однако силы трения в контакте выше, чем при чистом качении. Отсюда следует, что при проскальзывании контактирующих поверхностей возрастают наибольшие приведенные напряжения, и зона действия наибольших касательных напряжений располагается на меньшей глубине основы.

При малой толщине смазочного слоя, не полностью разделяющего контактирующие поверхности, трение зависит от тех же факторов, что и при жидкостной смазке и от свойств материалов.

5. Трение при полужидкостной смазке

Такое трение имеет место при наличии одновременно жидкостной и граничной смазки. Нормальная нагрузка в случае трения при полужидкостной смазке уравновешивается нормальной составляющей сил взаимодействия поверхностей на площадках их контакта и силами гидродинамического давления в смазочном слое. Относительная доля каждой реакции зависит от нагрузки, скорости взаимного перемещения поверхностей, шероховатости, жесткости и макрогеометрии, количества и вязкости смазочного материала. Сила трения складывается из касательной составляющей сил взаимодействия поверхностей и сопротивления вязкому сдвигу.

Гидродинамическое действие жидкости может возникнуть в двух случаях. Во-первых, если макрогеометрия соприкасающихся поверхностей такова, что существует сужающийся зазор, в который масло может заклиниться при трении, то при подаче масла в достаточном количестве и при подходящих параметрах режима трения возникнет поток и образуется подъемная сила. Однако эта сила недостаточна для полного воспри-

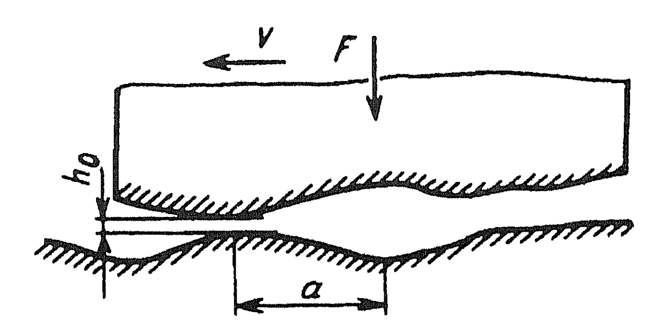


Рис. 3.10. **Схема элементарного гидродинамического клина, образованного неровностями трущихся поверхностей:**
a — длина элементарного масляного клина; *h* — начальный зазор между поверхностями в вершине элементарного клина

ятия нагрузки при полужидкостной смазке. Поток жидкости обтекает участки взаимного контакта поверхностей.

Во-вторых, если неровности между площадками контакта образуют в направлении относительного перемещения деталей места сужения и расширения по высоте. При достаточном количестве масла между поверхностями трения для заполнения микрополостей сужения играют роль гидродинамических микроклиньев (рис. 3.10).

Гидродинамическое действие масла на микроклиньях проявляется уже при самой малой скорости скольжения.

Преимущество смазочных масел перед твердыми смазочными материалами заключается в том, что они могут не только создавать гидродинамический эффект при соответствующих условиях, но и служить для охлаждения узла трения.

6. Режимы трения в подшипнике скольжения

Рассмотрим условия перехода из одного вида трения в другой в присутствии жидкого смазочного материала. Если количество масла ограничено, но достаточно для образования адсорбированного монослоя и граничной пленки, то при трении первичный слой на вершинах неровностей поверхностей быстро износится, и трение при граничной смазке перейдет частично в трение без смазочного материала. Правда, благодаря подвижности полярно-активных молекул адсорбированный монослой быстро восстанавливается, но на восстановление граничной фазы за счет передвижения масла из впадин неровностей потребуется относительно значительное время. После восстановления граничной пленки условия трения улучшаются. Это может привести к колебаниям коэффициента трения.

В итоге весь смазочный материал через какой-то период срабатывается. Если же, помимо расхода на образование граничной пленки, имеется избыток масла, который достаточно заполняет впадины неровностей,

то он служит для восстановления изнашиваемой граничной пленки. В этом случае трение при граничной смазке устойчиво. С увеличением подачи масла до необходимой для создания гидродинамического эффекта на выступах неровностей поверхностей или на макрогеометрических неровностях сопрягаемых тел трение при граничной смазке переходит в трение при полужидкостной смазке. Последний вид трения вне зависимости от скорости скольжения поверхностей и вязкости смазочного материала присущ всякой паре трения при наличии достаточного количества смазочного материала.

Для конкретности рассмотрим подшипник скольжения. Пусть нагрузка, геометрические размеры, диаметральный зазор подшипника, вязкость смазочного материала сохраняются постоянными. Будем изменять скорость вращения цапфы. При малой скорости скольжения поверхностей гидродинамический эффект для полного отделения поверхностей не может развиваться, так как масло выдавливается из зазора. Трение только полужидкостное. С увеличением скорости скольжения гидродинамические силы возрастают и взаимодействие поверхностей снижается, наконец при некоторой скорости произойдет полное разделение поверхностей и наступит режим трения при жидкостной смазке. Дальнейшее увеличение скорости скольжения приведет к повышению внутреннего трения в слое смазочного материала, и коэффициент трения возрастет. Минимум коэффициента трения соответствует началу трения при жидкостной смазке.

Аналогичное явление будет при изменении вязкости смазочного материала: при малой вязкости масла жидкостной смазки не будет; но после достижения упомянутого минимума коэффициента трения увеличение вязкости масла повышает сопротивление трению. Противоположно действует удельная нагрузка: при большом давлении на опору условия для жидкостной смазки неблагоприятны, снижение нагрузки до некоторой величины приводит к "всплыванию" цапфы: дальнейшее уменьшение нагрузки сопровождается увеличением толщины несущего слоя смазочного материала и сопротивления трению. Таким образом, режим трения в подшипнике определяется вязкостью η, скоростью скольжения v *и* давлением p, точнее, фактором $\eta v/p$.

Наглядное представление об условиях перехода одного режима трения в другой дает диаграмма Герси, в которой коэффициент трения f связан с параметром $\eta v/p$ (рис. 3.11) [12]. Этот параметр называют характеристикой режима подшипника. На диаграмме линия *аа,* проходящая через точку минимума коэффициента трения, разделяет области трения при жидкостной и других видах смазки. Последняя является областью неустойчивого коэффициента трения. Допустим, что подшипник работает в режиме граничной смазки и по какой-либо причине повысилось давление. Тогда значение $\eta v/p$ уменьшится, и начальная точка на диаграмме переместится влево вверх. Сила p трения возрастет, температура поверхностей и смазочного материала повысится, вязкость смазочного материала понизится, и сила трения еще более возрастет. При граничной смазке

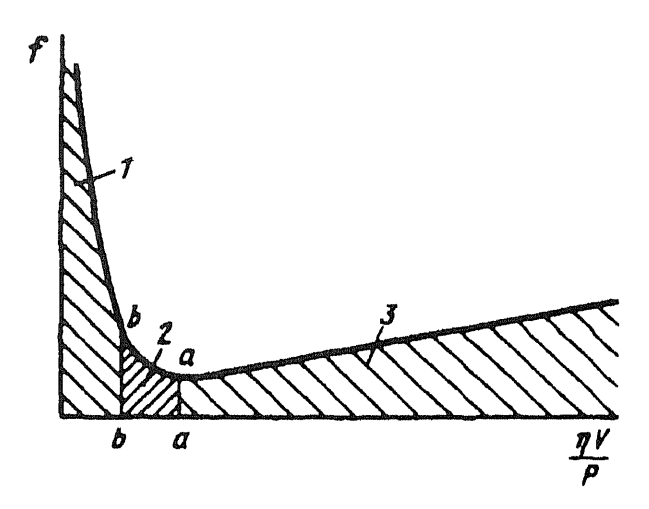


Рис. 3.11. **Диаграмма режимов трения в подшипнике:**
1 — трение несмазанных поверхностей; *2* — трение при граничной и полужидкостной смазке; *3* — трение при жидкостной смазке

с повышением нагрузки возрастает температура, и граничная пленка местами разрушается трение, будет происходить без смазочного материала. Линия *bb* отделяет область трения при граничной смазке от области трения несмазываемых поверхностей.

Аналогично можно установить неустойчивость коэффициента трения при снижении скорости в зоне трения при граничной смазке и трения несмазываемых поверхностей и при падении вязкости смазочного материала в случае повышения температуры.

Если же режим трения соответствует точке, расположенной справа от линии *aa,* то в узком интервале изменения $\eta v/p$ сила трения стабильна. Например, кратковременное нарастание скорости скольжения поверхностей вызовет более сильное тепловыделение в подшипнике, вязкость смазочного материала уменьшится, коэффициент трения понизится, и характеристика режима восстановится. Своеобразное саморегулирование режима трения при жидкостной смазке обязано изменению вязкости масла с изменением температуры.

Фактор $\eta v/p$ является характеристикой режимов трения при полужидкостной и жидкостной смазке. При других видах трения вязкостные свойства смазочного материала можно не принимать во внимание. Что касается изменения коэффициента трения при малых, близких к нулю, значениях характеристики режима, то в зависимости от материалов деталей и среды кривая от точки, соответствующей коэффициенту трения покоя (скорость скольжения $v = 0$), может монотонно убывать либо возрастать и, пройдя через максимум, снижаться вплоть до критического режима (минимального коэффициента трения).

Диаграмма Герси пригодна также для анализа явлений трения в подпятниках и парах трения с возвратно-поступательным движением. В этих

парах, как следует из диаграммы, на протяжении одного хода возможны различные режимы трения.

В заключение коснемся вопроса о смазывании водой. Молекулы воды гидроксильной группы ОН способны прикрепиться к чистой поверхности металлов, пластмасс и резины. На неметаллах образуется прочный ориентированный монослой. В условиях отсутствия гидродинамического эффекта смазки в парах металл—пластмасса и металл—резина осуществляется смазка водой. В парах металл—металл такое трение быстро переходит в трение без смазочного материала.

7. Трение качения

Сила трения качения по крайней мере в 10 раз меньше силы трения скольжения. Наличие силы трения качения объясняли раньше скольжением сопряженных поверхностей. Позднее было установлено, что оно влияет на силу трения качения. Сопротивление качению объясняется деформационными потерями в нижележащем твердом теле. При отсутствии пластической деформации трение обусловлено гистерезисными потерями в твердом теле.

Взаимное проскальзывание поверхностей можно представить при рассмотрении качения шарика (рис. 3.12). Окружность *AB* шарика перемещается посередине канавки, а окружность *CD* касается ее края. Как видно из рисунка, окружность *A B* проходит за один оборот шарика большее расстояние, чем окружность *CD*. Эта разница и обусловливает скольжение поверхностей трения.

Гистерезисные потери при трении качения поясним с помощью рис. 3.13 [2].

Еще О. Рейнольдс заметил, что когда цилиндр из твердого материала катится по плоской поверхности резины, то при каждом обороте он проходит путь меньший, чем длина окружности цилиндра. Он предположил, что резина растягивается в точке *C* по-другому, чем в точках *B* и *D* в результате имеет место, как уже упоминалось, проскальзывание с соответствующим рассеиванием энергии. Из рис. 3.13 видно, что спереди под

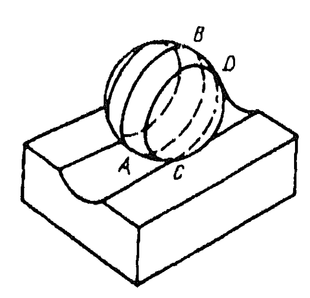


Рис. 3.12. **Шарик, катящийся по канавке**

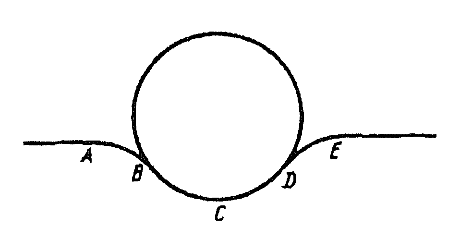


Рис. 3.13. **Шарик, катящийся вправо по плоскому упругому основанию**

шариком в точке E образуется углубление, а сзади в точке A деформационный материал полностью (при резине), а при металлах частично восстанавливается под действием сил упругости либо упругого гистерезиса; кроме того, вследствие необратимой пластической деформации силы реакции позади шарика меньше, чем силы давления впереди него. В результате шарик совершает работу деформации.

На поверхностях тел качения, как и при их скольжении, возникают силы сцепления. Адгезионное сцепление незначительно влияет на силы трения качения (наличие граничной смазки почти не сказывается на силе трения качения), но играет большую роль в изнашивании тел качения.

С помощью метода радиоактивных изотопов доказано, что при качении шарика из сапфира по поверхности меди происходит некоторый перенос металла с дорожки качения на шарик. Если поверхности смазаны олеиновой кислотой, то сопротивление качению шарика не изменяется, однако количество перенесенной меди снижается более чем в 4 раза [4].

При трении качения, в случае твердых тел, деформации поверхностей невелики, и окисные пленки, имеющиеся на поверхностях трения, не подвергаются значительным разрушениям. Поэтому скольжение поверхностей происходит не по металлу, а по окислам, которые могут изнашиваться. Это и объясняет влияние скольжения на износ тел качения.

Для приработанного состояния поверхностей по экспериментальным данным сила трения качения

$$F = kN^n/D^m,$$

где k — константа, зависящая от материала; N — нагрузка на шарик; D — диаметр шарика; n = 1,7...1,85; m = 1,5...1,6.

Сила трения в подшипниках качения при высоких скоростях зависит от вязкости смазочного материала и может достигать больших величин. На силу трения в подшипниках качения оказывают влияние вязкость смазочного материала, трение в сепараторе подшипника, размер шариков, шероховатость поверхности и др.

Момент трения в подшипниках качения

$$M = 0{,}5\mathrm{f}_Q\, Qd \quad \text{или} \quad M = 0{,}5\mathrm{f}_T Td,$$

где f_Q и f_T — коэфффициенты трения при радиальной и осевой нагрузках, отнесенные к диаметру вала d; Q и T — радиальная и осевая нагрузки.

Сила трения в подшипниках качения увеличивается в случае технологических и монтажных погрешностей, повышенных скоростей и при трении в уплотнениях. Значения коэффициентов трения в различных видах подшипников качения находятся в диапазоне 0,002...0,008 [10].

8. Эффект аномально низкого трения

Российские ученые А.А. Силин, Е.А. Духовский и др. в 1969 г. открыли явление сверхнизкого трения. Коэффициент трения полиэтилена и пропилена при трении в вакууме под воздействием потока атомов гелия (и некоторых других элементов) уменьшился на два порядка. Первоначально коэффициент трения был равен 0,10...0,13, а при включении атомного пучка плотностью 10^{13} атомов на 1 $см^2$ с энергией 2 кэВ снизился до 0,0015. Опыты проводили при нормальной температуре, скорости скольжения 0,2 м/с, давлении 20...60 кПа и разрежении в камере $665 \cdot 10^{-6}$... $665 \cdot 10^{-4}$ Па. После прекращения облучения коэффициент трения восстанавливался до первоначального. На полистироле и политетрафторэтилене эффект не проявлялся.

Интенсивность изнашивания при сверхнизком трении резко снижается. Исследования, проведенные во ВНИИ оптико-физических измерений, показали, что при облучении тончайший поверхностный слой вещества переходит в упорядоченное состояние. Это состояние характеризуется малой поверхностной энергией и остается устойчивым при нормальной и повышенной температурах.

Эффект может проявиться и без облучения, если вещество имеет слоистую кристаллическую структуру (например, молибденит). Ориентация структуры такого вещества при трении в вакууме происходит за счет энергии трения. Однако этому процессу мешают примеси, особенно молекулы воды. Бомбардировка ускоренными частицами выгоняет воду, что способствует более быстрой ориентации вещества.

Авторами эффекта создан новый самосмазывающий материал, способный работать в тяжелых и экстремальных условиях. В вакууме при высоких нагрузках он выдерживает как низкие температуры, так и нагрев до 1000°С, а при облучении "короткопробежными" частицами реализует сверхнизкое трение. Материал апробирован в реальных конструкциях и применяется на предприятиях различных отраслей. Источники излучения могут быть портативными, а дополнительный расход энергии для их питания мал по сравнению с выигрышем от снижения потерь на трение.

Глава 4. МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПАР ТРЕНИЯ И РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАШИН

1. Основные понятия

Пара трения — совокупность двух подвижно сопрягающихся поверхностей деталей (образцов) в реальных условиях службы или испытаний. Помимо материала, формы контактирующихся поверхностей, относительного их перемещения, пара трения характеризуется окружающей средой, в том числе видом смазочного материала. Пара трения образуется соприкасающимися поверхностями деталей, входящих в машинный узел; с такой точки зрения зубья ковша экскаватора и грунт в совокупности не образуют пару трения. В техническом обиходе и литературе встречается также термин "узел трения", под которым понимают узел машины, содержащий пары трения. Возможен износ поверхностей деталей, не входящих в состав пар трения, например при относительном микросмещении соприкасающихся поверхностей деталей неподвижных соединений.

Введем основные понятия, относящиеся к износу деталей и рабочих органов машин.

Изменение размеров и формы детали в результате изнашивания именуют износом. Его выражают в единицах длины, объема или массы.

Интенсивность изнашивания — отношение износа детали (или испытуемого образца) к пути трения или объему выполненной работы. При определении интенсивности изнашивания может оказаться более целесообразным относить износ к другому показателю, общему для всех узлов и агрегатов данной машины. Так, для автомобилей в качестве такого показатели может быть принято число километров пробега, а для тракторов число гектаров пахоты.

Скорость изнашивания — отношение износа детали к времени, в течение которого проходило изнашивание.

Износостойкость оценивают величиной, обратной интенсивности или скорости изнашивания.

Предельным износом детали (узла) называют износ, при котором дальнейшая эксплуатация становится невозможной вследствие выхода детали (узла) из строя, неэкономичной или недопустимой ввиду снижения надежности механизма.

2. Механизм изнашивания металлических поверхностей

В практике машиностроения эмпирическим путем с использованием простейших закономерностей из области трения разработаны расчетные способы и правила, относящиеся к конструированию элементов пар трения при граничной полужидкостной смазке и трении без смазочного

материала, к подбору материалов, способам упрочнения поверхностного слоя металла детали и вопросам смазки, ограничиваясь простейшими представлениями о механизме изнашивания. По аналогии с первыми элементарными представлениями о трении считали, что в процессе изнашивания неровности одной поверхности зацепляются за неровности сопряженной поверхности; это приводит при скольжении поверхностей к срезанию и выламыванию неровностей. В результате вырывов образуются новые неровности. Так процесс продолжается с выглаживанием поверхностей трения.

Еще в 20-х гг. и даже в современной технической литературе изнашивание представляли как сочетание двух одновременно протекающих процессов истирание и смятие неровностей поверхностей. Под первым подразумевали отрыв или срезание частиц с последующим их удалением. Мерой истирания служит потеря массы изнашиваемого объекта. Под смятием понимают изменение линейных размеров детали, происходящее без потери ее массы, за счет расплющивания.

Механическая теория изнашивания противоречила некоторым фактам и не объясняла ряд других. Например, механической точке зрения противоречит часто наблюдаемое повышение интенсивности изнашивания при снижении шероховатости поверхностей трения; остается неясным, почему для трения некоторых пар без смазочного материала при переходе через определенную скорость скольжения интенсивность изнашивания падает в сотни раз.

Ложное представление об исключительной роли зацепления выступов неровностей в процессе изнашивания создается на основании рассмотрения профилограмм обработанных поверхностей (см. рис. 1.7). Как видно, массовое зацепление неровностей поверхностей исключается.

М. Финк в 30-х гг. экспериментально установил повышенную окисляемость поверхностей металлов при трении. Это побудило ряд авторов приписать химическим процессам едва ли не решающую роль в кинетике изнашивания [25].

Успехи в разработке физической стороны процесса трения, привлечение современных методов физического эксперимента к опытному изучению процесса, тщательное физико-химическое исследование природы поверхностных слоев твердого тела и накопленный большой экспериментальный материал позволили глубже познать механизм изнашивания.

Для анализа расчленим процесс изнашивания на три явления: *взаимодействие поверхностей трения; изменения, происходящие в поверхностном слое металла; разрушение поверхностей* [22].

Эти явления не следует рассматривать как последовательные этапы они непрерывно переплетаются, взаимно влияя друг на друга. Разумеется, взаимодействие поверхностей при их относительном перемещении изменяется. Точно так же разрушение поверхностей является завершающим этапом их изнашивания. Тем не менее, поскольку разрушение не охватывает одновременно всю поверхность трения (оно происходит, как правило, в отдельных ее участках), другие участки претерпевают только

физико-химические изменения. Частичное разрушение и изменения свойств поверхности влияют на взаимодействие поверхностей.

Взаимодействие поверхностей может быть механическим и молекулярным. Механическое взаимодействие выражается во взаимном внедрении (см. гл. 2) и зацеплении неровностей поверхностей в совокупности с их соударением в случае скольжения грубых поверхностей. Молекулярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Адгезия не только обусловливает необходимость приложения касательной силы для относительного сдвига поверхностей, но и может привести к вырывам материала. Схватывание свойственно только металлическим поверхностям и отличается от адгезии более прочными связями. Молекулярное взаимодействие возможно также на участках взаимного внедрения поверхностей. Оно обязательно будет при разрушении масляной пленки.

Прежде чем перейти к рассмотрению процессов, происходящих на металлических поверхностях трения и приводящих к изменению их начального состояния, отметим, что хрупкость и пластичность твердого тела не являются свойствами, присущими ему независимо от напряженного состояния. При одних напряженных состояниях тело может быть пластичным, а при других — полухрупким или хрупким. Так, при всестороннем равномерном растяжении пластические деформации не развиваются, и материал пребывает в хрупком состоянии. При равномерном всестороннем сжатии большинство твердых тел может воспринимать без разрушения огромные нагрузки. В случае неравномерного всестороннего сжатия в зависимости от главных напряжений тела могут находиться в пластичном, хрупком или переходном состоянии. Б.Д. Грозин показал, что при определенных условиях объемного сжатия даже такие обычно хрупкие материалы, как чугун и закаленная сталь, обладают значительной пластичностью [4].

Если выделить элемент (рис. 4.1) с площадкой фактического контакта в виде одной из граней этого элемента, то все его грани будут находиться под сжимающими напряжениями, поскольку под действием приложенной нормальной нагрузки по оси x элемент должен увеличиться в направлении осей y и z, но этому препятствует окружающий материал. На площадке контакта действует сила трения, и элемент поэтому находится под действием не только нормальных, но и касательных напряжений. Такое напряженное состояние способствует пластическому течению материала. Действительно, исследования рабочих поверхностей деталей машин в парах трения и опытных образцов после изнашивания показывают, что все металлы в условиях трения в пределах активного слоя подвергаются пластическому деформированию. Даже хром при трении затекает в каналы пористо-хромового покрытия [3].

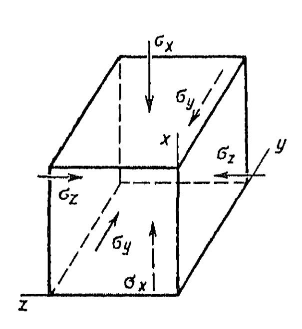


Рис. 4.1. **Схема напряженного состояния элемента поверхности твердого тела на площадке непосредственного контакта при трении**

Активным называют слой, который примыкает к контактирующей поверхности элемента пары трения и в котором могут происходить всякого рода физико-химические изменения, связанные с процессом трения.

Изменения на поверхностях трения обязаны деформации, повышению температуры и химическому действию окружающей среды.

Изменения, вызванные деформацией, заключаются в следующем.

1. Многократные упругие деформации из-за несовершенства структуры материала приводят в определенных условиях к усталостному выкрашиванию поверхностей качения, а многократные упругие деформации микронеровностей поверхностей скольжения разрыхляют структуру.

2. Пластическое деформирование изменяет структуру материала поверхностного слоя. Пластическое деформирование твердых тел складывается из четырех наиболее важных элементарных процессов: скольжения по кристаллографическим плоскостям (скольжение в отдельных зернах поликристаллического тела происходит обычно по нескольким плоскостям, число которых возрастает с повышением напряжения); двойникования кристаллов; отклонения атомов от правильного расположения в решетке и их тепловое движение; разрушения структуры.

Разрушение структуры — это заключительный этап пластической деформации по мере увеличения силового воздействия при однократном нагружении. Смещение кристаллических зерен сопровождается частичным нарушением сцепления, в результате при возрастании напряжения или многократном их повторении происходит ослабление, разрыхление, а в дальнейшем и разрыв структуры.

3. Пластическая деформация при температуре ниже температуры рекристаллизации приводит к наклепу поверхностного слоя — его упрочнению. Однако у самой поверхности структура несколько ослаблена, микротвердость понижена. Микротвердость достигает максимума на некоторой глубине, далее уменьшаясь до исходной.

4. При сильно отличающихся по твердости структурных составляющих материала и многократном воздействии нагрузки происходит вначале интенсивное изнашивание мягкой основы, вследствие этого повышается давление на выступающие твердые составляющие, они вдавливаются в мягкую основу, некоторые из них дробятся и перемещаются дополнительно под действием сил трения. В результате такого избирательного изнашивания поверхность обогащается твердыми структурными составляющими и приобретает строчечную структуру, что было обнаружено М.М. Хрущевым и А.Д. Курицыной при износе баббита [21].

Влияние повышения температуры.

1. Если по условиям службы или в результате трения температура поверхностных слоев выше температуры рекристаллизации металла, то поверхностный слой не наклепывается, а пребывает в состоянии повышенной пластичности (размягчения) — происходит выглаживание поверхности за счет растекания всего металла или только одной составляющей сплава. Это было показано, например, в случае размазывания одной из разновидностей фосфидной эвтектики в чугунах М.М. Снитковским.

2. Высокая температура и пластическая деформация способствуют диффузионным процессам; в итоге возможно обогащение поверхности некоторыми элементами (например, поверхности стали углеродом), коагуляция отдельных структурных составляющих, взаимное диффузионное растворение материалов деталей пар трения.

3. При интенсивном локальном повышении температуры (температурной вспышке) и последующем резком охлаждении поверхности окружающей холодной массой металла на поверхности могут образоваться закалочные структуры. Этому способствует высокое давление (от нагрузки), снижающее температуру, при которой происходят структурные превращения.

4. Пластическая деформация, возможные высокие температурные градиенты и структурные превращения, каждое в отдельности и совместно вызывают напряжения в материале, которые могут влиять на его разрыхление.

5. При микроскопическом исследовании контакта деталей в условиях высоких нагрузок и температур установлена [24] возможность образования магмы-плазмы (рис. 4.2). Взаимодействие микроконтактов происходит за очень короткое время ($10^{-7}...10^{-8}$ с), в течение которого к контакту подводится большая энергия. Для таких условий законы классической термодинамики не выполняются; материал тонкого поверхностного слоя преобразуется, в результате в зоне соударения неровностей образуется магма-плазма; процесс сопровождается эмиссией электронов. Об экзоэлектронной эмиссии при трении см. работу [7].

Химическое действие среды заключается в следующем.

1. В среде воздуха на обнаженных при изнашивании чистых металлических поверхностях образуются окисные пленки в результате действия кислорода газовой фазы или содержащегося в масле и его перекисях. Окисные пленки предохраняют поверхности от схватывания и связанного с ним глубинного вырывания и являются важным фактором не только при трении без смазочного материала и граничной смазке, но и при полужидкостной смазке. Опыты в вакууме, в среде азота, аргона и гелия при трении без смазочного материала и при граничной смазке, когда образование окисных пленок исключалось (могло быть только за счет кислорода в масле), показали весьма высокую интенсивность изнашивания поверхностей трения.

2. Металлические поверхности, взаимодействуя с химически активными присадками в масле, покрываются пленками химических соединений, роль которых аналогична роли окис-

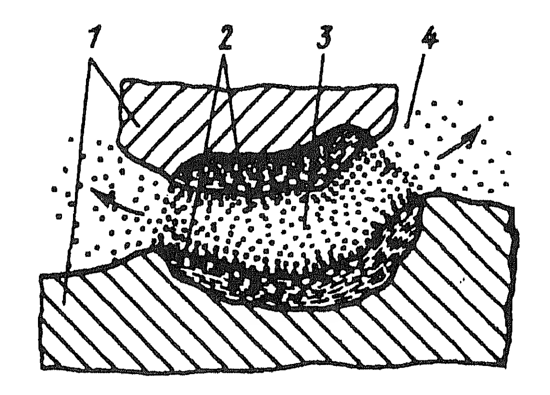


Рис. 4. 2. **Модель магмы-плазмы:**
1 — исходная структура; *2* — расплавленная структура; *3* — плазма; *4* — электроны, движущиеся при трибоэмиссии

ных пленок. Пленки эффективно защищают поверхность от изнашивания, если скорость их образования превышает скорость изнашивания.

3. Возможно насыщение поверхности углеродом в результате разложения смазочного материала при высокой температуре.

4. Агрессивные жидкости и газовые среды активизируют изнашивание. Очень интенсивно разрушает поверхности водород (см. 6).

Разрушение поверхностей трения, обнаруживаемое визуально или под микроскопом, происходит в виде отдельных элементарных процессов, сочетание которых зависит от материалов и условий трения. Элементарные виды разрушения поверхностей трения следующие [11].

Микрорезание. При внедрении на достаточную глубину твердая частица абразива или продукта износа может произвести микрорезание материала с образованием микростружки. Микрорезание при трении и изнашивании проявляется редко, так как глубина внедрения недостаточна для резания при назначаемых нагрузках.

Царапание (пластическое оттеснение). Вдавившийся участок поверхности или частица при скольжении оттесняет перед собой и в стороны и подминает под себя материал, оставляя царапину. Последняя обрывается при выходе внедрившегося элемента из зоны фактического контакта, при раздроблении частицы, ее впрессовывании или уносе за пределы области трения. Повторное царапание по одной трассе с одной и той же интенсивностью в парах трения бывает редко, чаще происходит царапание, при котором зона пластического оттеснения перекрывает ранее образовавшуюся царапину. Поверхность трения покрывается царапинами, расположенными почти параллельно пути скольжения, а между царапинами располагается материал, претерпевший многократную пластическую деформацию, наклепанный и перенаклепанный, т. е. исчерпавший способность пластически деформироваться. При нагружении в таком участке легко образуются трещины, с развитием которых материал отделяется от основы.

Очевидно, не только скользящие, но и перекатывающиеся частицы могут оставить на поверхности царапины. Внедрившаяся частица, упираясь при своем движении в твердую составляющую материала, может отклониться в сторону, и поэтому направление царапины на поверхности не следует строго направлению перемещения детали.

Отслаивание. Материал при пластическом течении может оттесняться в сторону от поверхности трения и после исчерпания способности к дальнейшему течению отслаиваться. В процессе течения материал наплывает на окисные пленки и теряет связь с основой. Если при линейном и точечном контакте тел напряжения по глубине слоя больше сопротивления усталости материала, то при работе образуются трещины, приводящие к чешуйчатому отделению материала. Такое явление встречается на закаленных или цементованных деталях. Дефекты металла в виде шлаковых включений, свободного цементита и т. п. и значительные растягивающие остаточные напряжения способствуют отслаиванию.

Выкрашивание — это распространенный вид повреждения рабочих поверхностей деталей в условиях качения. Для выкрашивания характер-

на произвольная форма язвинок с рваными краями. Могут выкрашиваться: твердые структурные составляющие сплава после того, как износится его мягкая основа; частицы белого слоя; островки основной массы серого чугуна, окаймленные графитовыми включениями; частицы антифрикционного металлического слоя при усталостных повреждениях; твердые окисные пленки (на железоуглеродистых и алюминиевых сплавах); частицы металлизационного покрытия и др.

Выкрашиванию способствуют высокие растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое после обработки, трещины после цементации, закалки или старения, а также значительные термические напряжения, возникающие при трении или вследствие неудовлетворительной смазки.

Непосредственно выкрашиванию предшествует образование и развитие трещин, ограничивающих малые единичные объемы от остального материала. Таким образом, трещинообразование является составной частью процесса выкрашивания, а также отслаивания. Трещинообразование из-за термических напряжений может охватить значительную площадь и на определенной стадии развития трещин может даже служить браковочным признаком, поэтому оно должно рассматриваться как особый вид повреждения поверхностей трения.

Глубинное вырывание возникает при относительном движении сцепившихся тел, когда образовавшийся вследствие молекулярного взаимодействия спай прочнее одного или обоих материалов. Разрушение происходит в глубине одного из тел. Поверхности разрушения у пластичных материалов представляют собой выступающие вытянутые по направлению движения гребни и суживающиеся в глубь материала конусы. Прилегающие к местам вырывов участки пластически деформируются в большей или меньшей степени. Вырванный материал остается на сопряженной поверхности. Это одна из причин переноса материала при трении. Может наблюдаться процесс схватывания отдельных составляющих сплава, остальные составляющие уносятся в смазочный материал или уходят из зоны трения.

При изнашивании разрушение поверхностей может происходить в субмикроскопических масштабах, когда вместе со смазочным материалом или воздухом уносятся обломки кристаллических образований. Продукты износа могут быть от размеров неразличимых пылинок до нескольких миллиметров; чистые поверхности в процессе образования окисляются, сами продукты износа в дальнейшем дробятся, слипаются, прилипают и впрессовываются в сопряженные поверхности. Продукты износа участвуют в процессе изнашивания в качестве промежуточной среды между поверхностями трения. Взаимное внедрение, глубинное вырывание, адгезия, заклинивание и впрессовывание продуктов износа предопределяют перенос материала с одной поверхности трения на другую.

Перенос материала с одной поверхности на другую свойствен всем видам трения, кроме трения при жидкостной смазке, и обнаруживается при таких технологических операциях, как резание, клепка и сборка болтовых соединений: металл переносится с пневматического молотка на

заклепки, с ключа на гайки, с резца на металл. Перенос материала происходит отдельными частицами, средний размер которых имеет вполне определенную величину для данных условий трения. Трение при граничной смазке может снизить перенос материала в 20 000 раз по сравнению с трением без смазки, главным образом за счет уменьшения среднего размера частиц. Перенос материала на металлическую поверхность может играть роль стимулятора коррозии металлической поверхности.

Перенос материала не характеризует износ поверхностей трения. Перенесенная частица может многократно переходить с одной поверхности трения на другую и обратно. Износ будет в том случае, если перенесенная частица уйдет из зоны трения. Это связано с процессами прямого и обратного переносов и зависит от конечного механизма отрыва перенесенной частицы, в частности, от ее окисления или же от возникновения неблагоприятных напряжений на границе раздела между частицей и подложкой. Перенос металла является одним из необходимых условий обеспечения ИП (см. часть 2 книги).

Описанный механизм отражает процессы изнашивания независимо от вида трения и режима смазки. Даже в режиме трения при жидкостной смазке, нарушаемом в отдельных участках поверхности, изнашивание протекает как при трении без смазочного материала и трении при граничной смазке. В рабочих органах машин процесс изнашивания может быть расчленен так же, как в парах трения, на те же элементарные акты разрушения. В отличие от пар трения инструмент, рабочие органы машин в каждый момент времени взаимодействуют с новыми поверхностями обрабатываемого материала.

Можно было бы полагать, что износ увеличивает силу трения. Однако это происходит не всегда. Если с повышением интенсивности изнашивания наблюдается увеличение коэффициента трения, то это, как уже отмечалось, является следствием изменения в контактном взаимодействии поверхностей в результате износа. Так, увеличение шероховатости поверхностей в результате износа приводит к их взаимному внедрению.

Аналогично можно сказать и о влиянии переноса материала на силу трения. Не всякий перенос может увеличить силу трения. Перенос стали на хром, стали на сталь, бронзы на сталь увеличивает силу трения; при ИП сила трения не увеличивается, при переносе олова, выделяющегося из антифрикционного материала, на сталь или полимерного материала на сталь коэффициент трения не возрастает.

В последние годы в России и за рубежом разрабатываются энергетические представления о трении и изнашивании (Г. Фляйшером, И.Р. Клейсом, Г. Пурше и др.). Большое внимание уделяется комплексному, системному подходу к процессам трения и изнашивания [23]. Механическая сторона трения рассматривается как причина, возбуждающая трибофизические и трибохимические процессы, вызывающие износ. Каждая реальная система изнашивания имеет законченное естественное или искусственное изображение, определенную структуру и окружающую среду. Из последней система изнашивания получает определенный про-

дукт (окислы, частицы износа) и вносит в нее определенный входной продукт (например, кислород, водород).

Такой подход к процессу изнашивания как к системе позволяет учитывать большое число факторов, влияющих друг на друга (физико-химические процессы, электрические явления, диффузия атомов и др.). Все это позволило автору работы [23] утверждать, что при современном состоянии теории трения и изнашивания невозможно точно предопределять продолжительность работоспособности конструкций на основе условий их нагружения или создать материал с оптимальной износостойкостью, используя теоретические представления.

2.1. Усталость при изнашивании металлических поверхностей

Впервые на усталостную природу изнашивания при трении скольжения указал Д.В. Конвисаров [10]. Причины усталости поверхностного слоя деталей он усматривал в повторных или знакопеременных движениях машин. Однократное задирание поверхностей, царапание их различными твердыми остриями не относятся к процессам изнашивания в полном смысле этого понятия. В результате Д.В. Конвисаров пришел к выводу, что изнашивание твердых тел силами трения родственно разрушению их от усталости. Он указал, что разница между обоими разрушительными процессами заключается в том, что за изнашиванием в процессе его развития можно легко проследить, усталость же металлов проявляется почти всегда внезапной аварией.

Д.В. Конвисаров считал, что продукты износа, состоящие из микроскопически малых обломков структуры тел трения, — основной признак изнашивания в точном смысле этого понятия. Все это относится к одной составляющей изнашивания — к диспергированию. Другая составляющая изнашивания — смятие поверхностей. Причем диспергирование и смятие действуют совместно.

Развивая представления об усталостной природе изнашивания твердых тел, Д.В. Конвисаров считает, что такие представления не могут быть полными без учета взаимодействия сопряженных тел со средой. Взаимодействие сопряженных тел с химически активными элементами газовой среды и смазочными материалами вносит много осложняющих влияний.

В 50-е гг. В:С. Радчик и А.С. Радчик провели исследование и экспериментально доказали знакопеременность напряжений в зоне контакта деталей при трении [16]. На рис. 4.3 приведена схема нагружения элементов поверхности вращающегося кольца при трении о неподвижный образец. Материал кольца перед неподвижным образцом испытывает напряжение сжатия, а после контакта этот же материал растянут. Сжатые участки кольца обозначены знаком минус, а растянутые — плюс. Таким образом, за один оборот материал кольца при наличии одного неподвижного образца будет испытывать одно сжатие и одно растяжение. При этом напряжения элементов поверхности неподвижного образца за период полного оборота кольца не изменяются.

Последние четыре десятилетия И.В. Крагельский и его ученики проводили исследования по дальнейшему развитию представлений об уста-

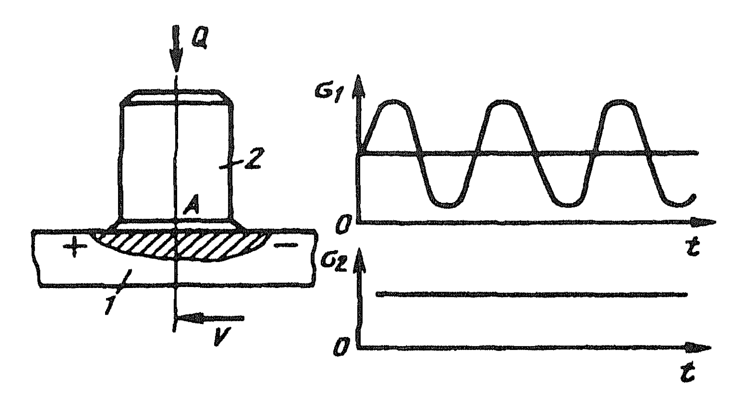


Рис. 4. 3. **Схема нагружения элементов поверхности кольца:**
1 — кольцо; *2* — образец; σ_1, — напряжения на площадке *A* кольца; σ_2 - напряжения на площадке *A* неподвижного образца; *t* — время

лостном характере изнашивания, основанных на том, что контакт поверхностей трения носит дискретный характер [11]. Пятно контакта испытывает многократное воздействие (тепловое, механическое) других пятен контакта. В результате в материале образуется трещина и происходит его разрушение.

2.2. Влияние реверсивного трения на изнашивание

Этот вопрос всесторонне изучен В.Д. Евдокимовым [6]. Результаты исследований свидетельствуют, что перемена направления движений пар трения уменьшает износостойкость как при трении скольжения, так и при трении качения. Это относится к металлам и полимерам. Знакопеременные сдвиговые деформации влияют на динамику изменения свойств и взаимодействие поверхностно-активных присадок с дислокациями. Введение поверхностно-активных веществ в смазочный материал снижает отрицательный эффект реверса при трении металлов.

При добавлении в смазочный материал поверхностно-активных веществ уменьшается сила трения и поверхностные (упругие) деформации. Если при использовании масла без присадок различие в упругих деформациях при одностороннем и реверсивном трении было большим, то при введении поверхностно-активных веществ это различие резко уменьшается.

Эффект Ребиндера при реверсивном трении проявляется в большей степени в результате расшатывания микроструктуры металла. В случае реверса наклеп поверхностного слоя больше, чем при одностороннем трении, но только на первых этапах работы. Дальнейшее знакопеременное деформирование исчерпывает возможности упрочнения микрообъемов, расшатывает их микроструктуру и вызывает интенсификацию усталостных процессов. Разупрочнение поверхностных слоев наблюдается не только при реверсивном трении, но и при одностороннем при тяжелых режимах.

При реверсивном трении, как показал О.Н. Курлов, легче возникает режим ИП, чем при трении с односторонним движением [13].

3. Механизм изнашивания полимеров и резины

Взаимодействие полимеров и резины с металлической поверхностью может быть либо механическим, либо молекулярным. Последнее проявляется только в виде адгезии. Зацепление неровностей поверхностей играет большую роль, так как пластическая деформация поверхностного слоя полимера под воздействием неровностей металлической поверхности, повышая число пятен контакта, увеличивает количество зацеплений. Это вторично стимулирует развитие пластической деформации активных слоев. В результате значительно возрастает сила трения. Если материал эластичный, например резина, то при прочих равных условиях шероховатость металлической поверхности не оказывает такого влияния, так как при отсутствии пластической деформации на перемещение затрачивается меньшая работа.

Если адгезия значительна, то разрушение возникающей связи возможно как по полимеру, так и по металлу. В итоге будет перенос материала с полимера на металл, с металла на полимер или одновременно с одной поверхности на другую. Это также объясняет наблюдаемое изнашивание более твердого металла более мягким полимерным материалом.

Из термопластов с точки зрения механизма изнашивания особый интерес представляет политетрафторэтилен (ПТФЭ). При его работе с гладкой стальной поверхностью при малой скорости скольжения происходит перенос полимера в виде очень тонкой пленки, внутри которой молекулы цепи ориентированы в направлении скольжения [18]. При дальнейшем скольжении по этой пленке дополнительный перенос полимера незначителен. Если ввести в полимерную цепь объемные боковые группы, то сила трения и интенсивность изнашивания возрастают.

При шероховатости стальной поверхности более $R_a = 0{,}1$ мкм ПТФЭ начинает интенсивно изнашиваться. Повышается и коэффициент трения. Подобное явление наблюдается при понижении температуры до –20°С: происходит срезание полимера выступами неровностей твердой сопряженной поверхности.

Полимерные материалы часто оказываются эффективными как покрытия или облицовочный материал в узлах трения, где, казалось бы, нужно применять особо твердые материалы. Некоторые полимеры могут поглощать большое количество энергии, прежде чем от их поверхности отделится частица. Это свойство полимеров используется, например, для повышения износостойкости ротора и статора флотационных установок, установок по перекачке пульпы в химической промышленности. Преимуществом полимера является еще и то, что он не подвержен коррозии.

Для уменьшения трения и снижения износа полимерного материала в него добавляют различные активные вещества, которые в процессе трения взамодействуют с рабочими поверхностями пары трения. Например, закись меди, использованная в качестве наполнителя поликапроамида и ПТФЭ, в глицерине может восстанавливаться до чистой меди и образовывать на поверхностях трения активный слой, резко снижающий износ пары трения (обеспечивающий ИП, см. часть 2). Кроме того, частицы

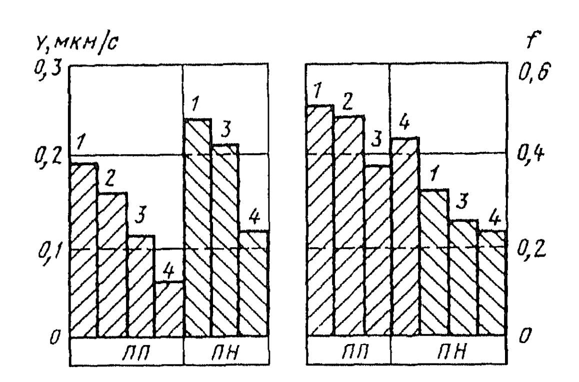


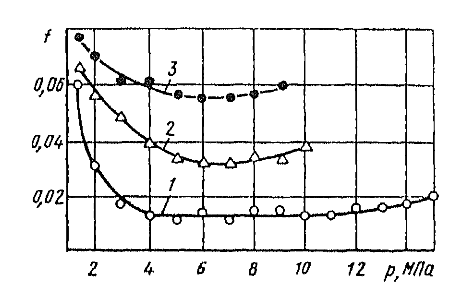
Рис. 4.4. **Скорости изнашивания и коэффициент трения в парах сталь — ПП; сталь— ПН; материал пресс-форм**:
1 — сталь; *2* — алюминий; *3* — Дуралюмина; *4* — ПТФЭ [20]

закиси меди выступают в роли искусственных зародышей структурообразования, что приводит к формированию более мелкой и однородной структуры по по всему сечению образца [20].

Износостойкость и коэффициент трения полимеров при работе со сталью зависят от материала пресс-формы, в которой формуется полимерная деталь [20]. Так, образцы из полипропилена (ПП) и пентопа (ПН) получали формованием при давлении 5 МПа и температуре 244°С. Материал пресс-формы был из стали, ПТФЭ, алюминия и дуралюмина. На рис. 4.4 показана скорость изнашивания и коэффициент трения полученных материалов при нагрузке 0,25 МПа и скорости скольжения 3 м/с. Как видно, максимальную износостойкость обеспечивает пресс-форма с поверхностью из ПТФЭ. Здесь формируется столбчатая структура ПП, и износостойкость его повышается в 3...3,5 раза.

Различная эффективность действия модифицирующих поверхностей алюминия и дуралюмина объясняется явлением "растворения" поверхностного слоя металла расплавами полимеров [20]. Авторы работы установили наличие избирательного растворения компонентов сплавов в среде жидкого полимера, что приводит к изменению его структуры и влияет на фрикционные свойства. После того как модифицированный поверхностный слой полимера износится, наблюдается повышение скорости изнашивания. Можно полагать, что материал пресс-формы влияет на термодинамические условия кристаллизации полимера.

Представляет интерес исследование Н. В. Акулича антифрикционных свойств образцов, изготовленных из эпоксидной смолы ЭД-5, модифицированной фурановыми мономерами ФА и порошком меди [1]. Смолы смешивали при температуре 50...60°С. В качестве отвердителя использовался полиэтиленполиамин. Композиция содержала 100 массовых частей медного порошка ПМ и 2...8 % поверхностно-активнцх веществ (жирные кислоты). На рис. 4.5 приведена зависимость коэффициента трения от давления при различных смазочных материалах. Значительное влия-



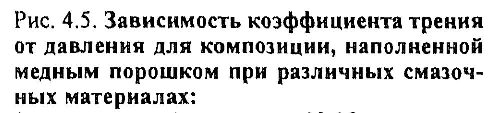


Рис. 4.5. **Зависимость коэффициента трения от давления для композиции, наполненной медным порошком при различных смазочных материалах:**
1 — глицерин; 2 — масло МС-20; *3* — нефть (по данным Н. В. Акулича)

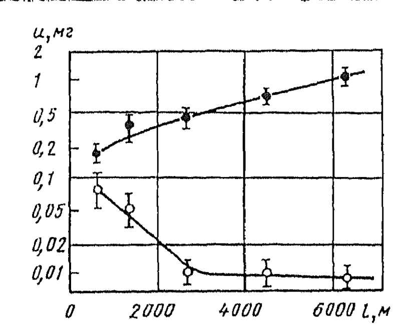


Рис. 4.6. **Зависимость износа полиэтилена высокого давления от пути скольжения по стальному диску из мягкой стали:**
●— чистый полиэтилен; ○ — полиэтилен с добавками 30% Pb_3O_4 $<$ и 5% CuO [20].

ние смазочного материала на коэффициент трения можно объяснить различием физико-химических процессов, протекающих в зоне контакта.

Интенсивность изнашивания полиэтилена резко снижается при введении в него до 30% Pb_3O_4 и 5% CuO. Образец диаметром 10 см из полиэтилена высокой плотности скользил по стальной поверхности в среде воздуха. При повторных проходах по одному и тому же месту интенсивность изнашивания полиэтилена медленно возрастала (рис. 4.6) в результате теплового размягчения. В случае наполненного полиэтилена после короткого периода приработки, в процессе которой на стальной поверхности образуется прочно сцепленная с ней пленка, интенсивность изнашивания полимера становится крайне низкой.

На коэффициент трения и интенсивность изнашивания полимеров может оказать влияние гамма-облучение [20]. При увеличении дозы облучения полиэтилена коэффициент трения и интенсивность изнашивания снижаются. Дальнейшее увеличение дозы облучения приводит к ухудшению антифрикционных характеристик полимера и переходу от пластического оттеснения материала к микрорезанию.

На процесс трения между металлом и полимерными материалами влияет температура. С повышением температуры ухудшаются упругие и пластические свойства материала и в зависимости от величины температуры происходят физико-химические процессы распада органического связующего или самого материала. Кроме того, если пластик обладает высокой адгезией к металлу, то с повышением температуры адгезия усиливается. У пластиков со слабой адгезией к металлу силы трения с повышением температуры увеличиваются незначительно.

Высокоэластичные материалы повреждаются при трении вследствие усталостного разрушения поверхностных слоев под действием повторных нормальных напряжений и сил трения. Разрушение происходит путем отрыва (силы трения обусловлены как адгезией на площадках кон-

такта, так и сопротивлением при движении внедрившихся выступов неровностей металлической поверхности). Менее эластичные материалы повреждаются вследствие микрорезания, царапания, отслаивания и выкрашивания.

Химические факторы в процессе изнашивания проявляются своеобразно. При повреждении поверхности полимера происходит разрушение отдельных молекулярных цепей, освобождаются свободные валентные радикалы и выступают наружу отдельные элементы в атомарном состоянии, что позволяет металлу и полимеру вступать в химическое взаимодействие. Образующиеся соединения разрушаются и возникают вновь.

В целом процесс изнашивания неметаллических материалов в паре с металлами или неметаллами не отличается от механизма изнашивания металлических материалов, но отдельные его закономерности обязаны особенностям физико-химических и механических свойств неметаллов и их изменениям в процессе трения.

4. Стадии изнашивания пар трения

Если отложить по оси абсцисс время *t* работы пары трения (рис. 4.7, а), а по оси ординат износ *u*, то получим кривую изнашивания детали во времени. Тангенс угла наклона α, образованного осью абсцисс и касательной к кривой в произвольной точке, определяет скорость изнашивания в данный момент времени.

На кривой изнашивания в общем случае (кривая 1) можно выделить три участка, соответствующие трем стадиям изнашивания: *I* — начальное изнашивание, наблюдаемое при приработке поверхностей деталей; *II* (прямолинейный участок кривой) — установившееся изнашивание

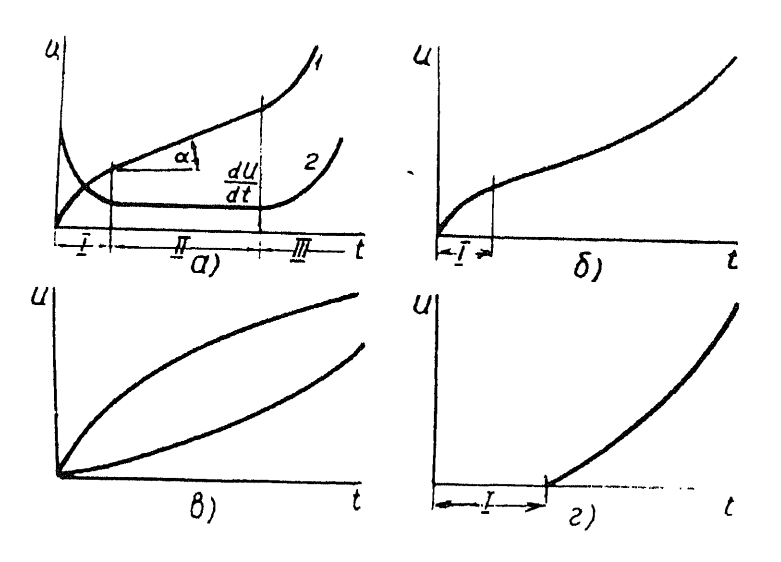


Рис. 4.7. **Кривые изнашивания**

(tg α = const.), наблюдаемое при нормальной эксплуатации сопряжения; *III* — процесс резкого возрастания скорости изнашивания, соответствующий стадии катастрофического изнашивания.

Детали после сборки сопрягаются по выступам неровностей поверхностей, и площадь их фактического контакта в начальный период трения мала, поэтому при нагружении пары трения действуют большие давления, результатом чего является значительная пластическая деформация; неровности поверхности частично сминаются и частично разрушаются как по выступам, так и по впадинам. Срабатывание микронеровностей и сглаживание макронеровностей и волнистости поверхностей сопровождается увеличением несущей поверхности, интенсивность изнашивания снижается. Вместе с тем "пропахивание" поверхностей взаимно внедрившимися объемами и продуктами износа в направлении относительной скорости поверхностей создает новые неровности, ориентированные вдоль направления движения и не совпадающие с направлениями обработочных рисок. Как показал П.Е. Дьяченко, по истечении определенного времени при неизменных условиях работы создается стабильная шероховатость поверхностей трения [5]. Она может быть больше или меньше начальной шероховатости: более грубые поверхности в процессе приработки выглаживаются, а гладкие становятся более грубыми. Каждая из сопряженных поверхностей к концу приработки приобретает свойственную ей шероховатость в данных условиях трения.

Микротвердость поверхностей трения к концу приработки стабилизируется независимо от их начального состояния. За время приработки происходит переформирование поверхности и изменение ее физико-химических свойств.

Процесс установившегося изнашивания заключается в деформировании, разрушении и непрерывном воссоздании на отдельных участках поверхностного слоя со стабильными свойствами. Износ деталей может существенно изменять свойства сопряжения. Увеличение зазоров в сочленениях ухудшает условия жидкостной смазки и может повысить фактор динамичности, а истирание цементованного или поверхностно-закаленного слоя открывает поверхности с пониженной износостойкостью. Изменения в макрогеометрии поверхностей (например, образование овальности и конусности шеек валов и цилиндров, местная выработка и волнистость направляющих, неравномерный износ зубьев колес по длине и т.п.) также являются причинами, ухудшающими условия трения. Эти и подобные им обстоятельства могут вызвать при дальнейшей работе сопряжения увеличение интенсивности изнашивания и привести к отказу соединения.

Кривая *2* на рис. 4.7, *а* изображает скорость изнашивания.

Кривая на рис. 4.7, *б* соответствует случаю, когда после окончания приработки постепенно накапливаются факторы, ускоряющие изнашивание, в силу чего отсутствует установившийся период. Кривые на рис. 4.7, *в* соответствуют случаям, когда отсутствует приработка, и период нормальной эксплуатации наступает сразу с начала работы. Кривые различаются зависимостями изменения скорости от времени. Эти закономернос-

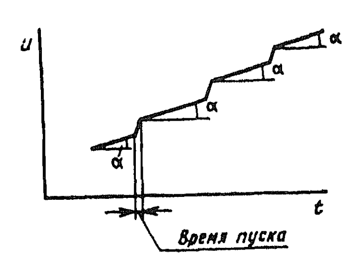


Рис. 4.8. **Участок кривой изнашивания а период нормальной эксплуатации машины с перерывами в работе [19]**

ти износа характерны для инструмента и рабочих органов машин. Им, например, «подчиняется» износ резца по задней грани или лезвия лемеха плуга по ширине задней фаски. Подобным образом могут изнашиваться и некоторые элементы машин, например цепные передачи сельскохозяйственных машин. Кривая изнашивания на рис. 4.7, *г* относится к деталям, находящимся под действием контактных напряжений, причем эти детали работают длительное время практически без истирания. Начавшееся усталостное выкрашивание поверхностных слоев усиливается действием продуктов разрушения.

Кривая изнашивания на самом деле не может быть плавной линией. Это связано с тем, что изменение физико-механических свойств поверхности накапливается за промежуток времени, на протяжении которого непосредственному разрушению подвергается малое число участков, и лишь после того, как количество изменений достигает определенного предела, разрушением охватывается большая часть поверхности; так процесс при установившейся скорости изнашивания циклически повторяется. В таком понятии кривая изнашивания должна была бы представлять собой непрерывную совокупность криволинейных отрезков с неубывающими ординатами [19].

Кривая *1* на рис. 4.7, *а* построена в предположении непрерывности работы пары трения от начала приработки до полной выбраковки либо до ремонта. Подавляющее большинство пар трения работает с перерывами, хотя бы вследствие остановки машины. Скорости изнашивания в периоды выбега и разбега выше, чем при установившемся режиме. В некоторых случаях износ за один пуск машины может оказаться равнозначным износу за несколько часов ее работы на установившемся режиме. В таком случае участок кривой изнашивания после приработки поверхностей будет иметь вид, изображенный на рис. 4.8. Ступенчатая ломаная может быть заменена прямой, но ее угловой коэффициент, равный средней скорости изнашивания за определенное время работы пары, будет превосходить скорость изнашивания при непрерывном установившемся режиме. Заметим, что нетрудно изобразить кривую изнашивания для работы пары на различных установившихся режимах с присущей каждому из них определенной скоростью изнашивания.

Кривые изнашивания, приведенные на рис. 4.7 и 4.8, характеризуют закономерность его во времени. Можно при надобности построить кривые изнашивания в зависимости от пути трения или другого характерного измерителя для данной машины или ее части.

5. Распределение износа между деталями

Изучая механизм изнашивания, нельзя обойти особенность, относящуюся к распределению износа между поверхностями трения в паре. Если материалы нескольких пар трения одинаковы, то при прочих равных условиях их износ (в пределах обычных колебаний) будет одинаковым. Если же материалы деталей разные, то и износы по массе и размерам будут различны. Интенсивность изнашивания каждой детали определяется его видом. Может случиться, что при одном виде изнашивания более интенсивно изнашивается одна деталь, а при другом виде изнашивания — другая. Ограничимся простейшими парами: ползун — направляющая при неравных площадях трения и вал — частичный вкладыш. Эксперимент показывает, что при одинаковых материалах износы поверхностей по массе не одинаковы: большая поверхность больше теряет массы. Соотношение линейных износов зависит от соотношения поверхностей трения. Сделано несколько попыток объяснить эффект влияния площади трения на массовый износ.

Первая гипотеза предложена В.С. Радчиком и А.С. Радчиком применительно к вращающемуся плоскому кольцу машин трения и сопряженными с ним по торцам трем неподвижным цилиндрическим образцам [16]. Она заключается в следующем: элемент поверхности кольца перед вступлением в контакт подвергается сжатию в соответствии с направлением сил трения, а после выхода из контакта — растяжению. На поверхности трения кольца за один оборот происходит три смены знака напряжения, в то время как на поверхности неподвижных образцов знак напряжения остается постоянным. Согласно этой гипотезе перемена знака напряжений является "ответственной" за повышенный износ кольца (см. рис. 4.3).

По второй гипотезе, высказанной акад. В.Д. Кузнецовым, образец с малой площадью трения уподобляется резцу, на котором при резании образуется нарост металла с высокой твердостью и прочностью при некоторых температурах, который царапает и изнашивает образец с большей площадью [12].

Основную причину большего износа по массе цилиндрических втулок двигателей внутреннего сгорания по сравнению с износом поршневых колец А.А. Старосельский и А.А. Вассерман объясняют тем, что путь абразивных частиц во втулке в несколько раз превышает путь их по кольцу. При неодинаковых материалах пар трения явление осложняется, так как дополнительно выступает новый фактор, который может при соответствующих режимах трения свести на нет эффект влияния размера площади на скорость изнашивания.

Третья гипотеза [2] исходит из того, что разрушение при изнашивании происходит в отдельных "слабых" местах пятен контакта. Эти слабые места присущи материалу изделия и вновь создаются в результате деформации поверхностного слоя. Бóльшая поверхность имеет больше слабых мест, поэтому она быстрее изнашивается.

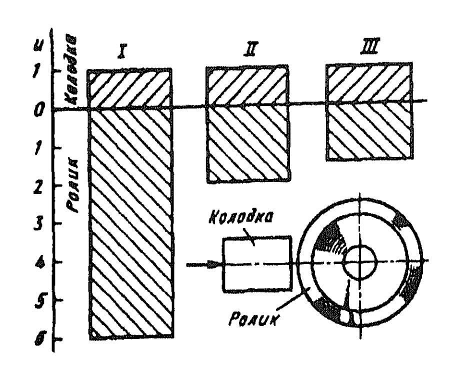


Рис. 4.9. **Соотношение износов *u* (в условных единицах) стальных образцов на машине трения при разных условиях:**
I – без смазочного материала; *II* - смазочный материал с абразивом; *III* – со смазочным материалом

На рис. 4.9 приведена диаграмма износов образцов из стали 45, испытанных на машине трения МИ при разных условиях и постоянных внешних параметрах режима трения. Длительность испытания была достаточной для определения с обычной точностью потери массы образцов. Как видно, соотношение износов изменяется. При случае I линейный износ образцов одинаков, хотя может казаться, что линейный износ поверхности, непрерывно находящейся в контакте, должен быть большим.

В результате испытаний на машине с возвратно-поступательным движением при постоянных внешних параметрах хромированной стальной пластины площадью трения 50×25 мм^2 и образца из серого перлитного чугуна площадью трения 2×25 мм^2 выявлены следующие отношения износа к массе образцов:

Смазывание маслом МС, температура нормальная	22 : 1
Смазывание маслом МС с наждачным абразивом, температура нормальная	3 : 1
Смазывание этиловым спиртом, температура нормальная	2 : 1
Смазывание маслом МС, температура +100°С	1,5 : 1
Без смазочного материала, температура нормальная	1 : 40

Как видно, при смазывании маслом и нормальной температуре бóльшая поверхность твердого хрома изнашивается интенсивнее, чем значительно менее твердый чугун. Добавка к маслу абразива увеличивает интенсивность изнашивания обеих поверхностей трения. Но так как мягкий чугун сильнее изнашивается абразивом, то разница износов образцов по массе заметно уменьшается. При трении в ванне со спиртом, охлаждающим и предохраняющим от окисления поверхности, и при трении в масляной ванне при температуре +100°С еще больше уменьшается разница между износами. Окислительное изнашивание чугуна при трении без смазочного материала и слабое абразивное изнашивание хрома приводит к изменению соотношения износов: чугунный образец стал изнашиваться в 40 раз быстрее хромированного.

Эти опыты подтверждают зависимость отношения износов от условии трения, которое для пары хром—чугун изменялось более чем в 800 раз. Отсюда можно сделать вывод, что истинную износостойкость двух разноименных образцов будут характеризовать только такие испытания, при которых площади трения образцов будут одинаковыми.

Поскольку на отношение износов трущихся поверхностей решающее влияние оказывают условия трения, то по этому отношению можно приближенно определить условия работы реальных деталей и, наоборот, по условиям работы реальных деталей определить отношение их изно-

сов. Это отношение является одним из критериев моделирования процессов, протекающих на поверхностях трения. В этой связи следует указать на методику определения изнашивания (абразивное или коррозионное) цилиндров, основанную на распределении износа по высоте зеркала цилиндра. Как показали эксперименты В. Винкенса, при абразивном изнашивании гильза изнашивается больше в средней части, а при коррозионном — в верхней части.

Несмотря на то, что с момента первых исследований по распределению износов в зависимости от поверхности трения прошло более 40 лет, интерес к этому вопросу остается. В работе [9] приведены результаты исследований по взаимному изнашиванию образцов из одноименных материалов с разными поверхностями трения. Автор пришел к выводу, что в этом случае цикличность напряжений не сказывается на соотношении износов образцов, а решающим фактором является процесс схватывания и переноса металла. Все это обусловлено наличием адгезии, неравенством температур компонентов пары трения, переносом, наростообразованием и наличием элементов абразивности при трении.

Б.В. Протасов, изучая изнашивание деталей с неравновеликими поверхностями трения, пришел к выводу, что решающим в этом процессе является распределение теплоты между деталями [15]. По его мнению, быстрее изнашивается тело, которое быстрее вращается, а, следовательно, более интенсивно охлаждается (естественно, в определенном диапазоне). Рассматривая влияние теплового потока на износ, приведем результаты исследований линейных износов двух пар зубчатых колес из алюминиевого сплава Д1-Т при возвратно-вращательном движении. Две сравниваемые пары нагружались пружиной, чем достигалось одинаковое значение $p \cdot v$ (произведение давления на скорость скольжения); трение было без смазочного материала, окружное усилие 10Н. Эксперименты показали (рис. 4.10), что скорость изнашивания левой пары $u_{1+2} = 11$ мкм/ч, а правой пары $u_{1+2} = 15,7$ мкм/ч. Указанное различие объяснялось тем, что в каждой паре одно колесо подогревалось воздухом до температуры 40 °С, а другое не подогревалось. В правой паре большая доля объемного износа распределялась на 17 зубьев, в результате их износ по толщине резко увеличивался, а в левой паре боль-

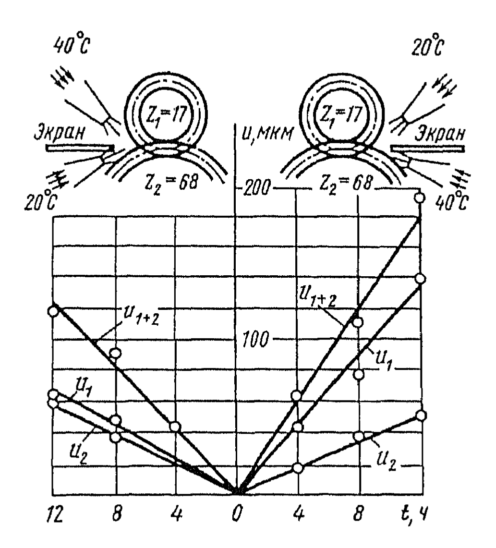


Рис. 4.10. **Влияние преимущественного теплоотвода от зоны трения на суммарный линейный износ зубчатых колес из алюминиевого сплава**

шая доля объемного износа распределялась на 68 зубьев, что дало относительно небольшое уменьшение их толщины.

Оригинальные опыты по оценке распределения износа между неравновеликими поверхностями проводил В.Д. Евдокимов [6]. Он обратил внимание на различие наклепа образцов, имеющих разные поверхности трения.

Все приведенные гипотезы о неравномерном распределении износа между деталями, имеющими разные поверхности трения, основаны на экспериментальных данных, поэтому, видимо, нельзя объяснить одним фактором причину неодинаковой скорости изнашивания деталей.

6. Влияние электрического тока на износ

Внешнее электрическое поле является фактором, влияющим на процесс изнашивания. Х. Бергенхейм на основе большого числа наблюдений на нескольких десятках судов установил наличие повышенного износа работающих на сернистом топливе дизелей при низкой изоляции проводов судовой электрической установки. Вероятно, причиной этого явилось включение цилиндро-поршневой группы в контур электрической установки, усиливающее коррозию. В тот же контур безусловно включаются валы и подшипники.

Имеются, однако, примеры, когда пропускание электрического тока через пару трения положительно сказывается на износостойкость детали. Так, для уменьшения силы трения и износа поверхностей предлагается вводить в смазочное масло до 5% присадок, состоящих из органических фосфидов соответствующих металлов, и пропускать постоянный электрический ток низкого напряжения силой 1...10 А через слой масла, заключенный между поверхностями трения [Пат. 977-577 (Англия)]. При прохождении тока происходит электролитическое осаждение металла на поверхности трения из присадок, добавленных в масло, в результате уменьшается сила трения и износ поверхностей. Метод может быть применен для подшипников турбин, двигателей внутреннего сгорания, электрических генераторов. Электрический ток в этих случаях пропускают через слой масла в подшипниках.

Для уменьшения износа фильер проволоку или прут, прежде чем протянуть в фильеру, пропускают через масляную ванну с присадками. Один полюс от источника тока подключают к проволоке (пруту), а другой к станине фильеры. По этому вопросу имеются работы А.Д. Дубинина и С.Н. Постникова [14].

При резании металлов между резцом и заготовкой возникает ЭДС, отрицательно влияющая на стойкость режущего инструмента. Изоляция инструмента, по данным В.А. Бобровского, в некоторых случаях повышает его стойкость в 2...3 раза.

Однако не все исследователи придерживаются мнения, что изоляция инструмента от заготовки может повысить его стойкость. В ряде работ

доказывается, что этот способ не дает практического результата. По-видимому, в этом направлении требуются дальнейшие исследования.

При трении полимера о металл на скорость изнашивания может влиять протекторная защита, а также пропускание тока (исследования выполнены Ш.М. Биликом и Г.А. Гороховским).

По данным Ю.А. Евдокимова и В.И. Колесникова, при трении металла о полимер последний может заряжаться положительно или отрицательно в зависимости от свойств полимера. Установлено, что применяемая для определения полярности пластмассы токосъемная щетка при трении о пластмассу может качественно изменить результаты измерения. Приобретение пластмассой положительного заряда создает благоприятные условия для переноса металла на ее поверхность [8].

Исследования В.И. Колесникова показали, что при трении фрикционной пластмассы о сталь при положительном заряде пластмассы происходит интенсивное наводороживание стальной поверхности и ее разрушение (см. гл. 6).

Анализируя электрические явления при трении и резании металлов, Ю.М. Коробов и Г.А. Прейс отмечают, что имеется ряд гипотез о влиянии слабых электрических токов на процессы трения при резании. Эти токи, по данным Н.Л. Гордиенко и С.Л. Гордиенко, оказывают эрозионное разрушающее воздействие на инструмент; влияют на интенсивность образования окисных пленок, как утверждают Г. Опитц и А.А. Рыжкин [17]; вызывают электродиффузионный износ режущего инструмента, как показал В.А. Бобровский; по данным В.Я. Кравченко, О.А. Троицкого, А.Г. Розно, вызывают разрядку дислокаций и увеличивают пластичность поверхностного слоя, так же как магнитные и электрические поля; влияют на стойкость инструмента посредством эффекта Пельтье, как показали А.Т. Галей и Г.И. Якунин.

Важной характеристикой физико-химических процессов в зоне контакта является электродный потенциал φ. По изменению этой характеристики можно судить, как это доказано Г.А. Прейсом, о наличии защитных пленок. Электродный потенциал при трении поверхностей $\varphi_{тр}$ отличается от потенциала $\varphi_з$ этих же поверхностей, но очищенных от пленок (потенциал зачистки). Если $\varphi_{тр}$ приближается к значению $\varphi_з$, то это означает, что пленки изнашиваются; при росте пленок разница между $\varphi_{тр}$ и $\varphi_з$ возрастает.

С. Н. Постников [14], изучая электрические явления при резании металлов в присутствии электропроводящей СОЖ и рассматривая участие электролита в качестве капиллярной прослойки, отмечает наличие скачков потенциала на границе металл—раствор. Это приводит к возникновению короткозамкнутого гальванического микроэлемента с ЭДС. В зоне фактического контакта при действии этого элемента возможно протекание окислительно-восстановительных процессов.

7. Влияние вибрации на изнашивание деталей

При изучении изнашивания деталей трансмиссии тракторов (игольчатые подшипники карданных передач, шлицевые соединения, зубчатые муфты) С.А. Лапшин экспериментально установил, что наличие высокочастотных составляющих (более 20 Гц) в спектре динамических нагрузок, хотя и не превосходящих 10...20% средней эксплуатационной нагрузки, приводит к существенному повышению интенсивности изнашивания. Эти данные позволили выдвинуть гипотезу (которая затем была подтверждена экспериментально), что динамические нагрузки, вызывая переменные деформации материала в контакте сопряженных деталей, приводят к появлению переменного потока магнитной индукции в деформируемом слое. Изменение магнитного потока наводит ЭДС индукции в контуре, образованном сопряженными деталями. Электрическое сопротивление между этими деталями, обусловленное свойствами окисных пленок и смазочного материала, приводит к переменной разности потенциалов в зоне контакта, что служит причиной поверхностной активации и развития окислительного изнашивания, схватывания или даже электроэрозионных процессов, существенно снижающих долговечность сопряжения.

Это явление было названо электродинамическим фактором изнашивания. Для его экспериментального изучения использовались различные сопряжения машин: игольчатые подшипники карданных передач, шлицевые соединения и др. Их подвергали динамическому нагружению на стенде, причем амплитудно-частотные характеристики динамических нагрузок соответствовали их реальным эксплуатационным значениям. Измеряли амплитуду и скорость изменения потока магнитной индукции в сопряжении, электрические потенциалы на поверхностях сопряженных деталей, контролировали состояние поверхностей, электрическое сопротивление между контактирующими деталями, их температуру (среднюю и в стыке), оценивали возможность появления электрических разрядов в зоне контакта сопряженных деталей под действием динамических нагрузок, проводили сравнительные испытания на износ.

Для измерения потока магнитной индукции использовали малогабаритные индуктивные датчики, которые устанавливали в зоне контакта, например, вместо одного из игольчатых роликов подшипника шарнира карданной передачи. Для измерения поверхностных потенциалов сопряженных деталей к каждой из них были припаяны изолированные провода. Электрическое сопротивление в контакте сопряженных деталей измеряли при постоянных нагрузках с точностью до третьего знака. Появление электрических разрядов в контакте под действием динамических нагрузок оценивали с помощью малогабаритной антенны в виде отрезка изолированного провода, размещенного в зоне контакта и соединенного с помощью экранированного и заземленного кабеля с входом транзисторного радиоприемника. При подготовке к испытанию были приняты меры против сетевых помех и влияния внешнего фона электромагнитных волн.

По результатам экспериментов построены кривые ЭДС магнитной индукции в функции амплитудно-частотных характеристик динамических нагрузок. Нарастание ЭДС индукции пропорционально частоте динамического нагружения при неизменных амплитудных значениях этих нагрузок. Следовательно, наибольшие изменения потока магнитной индукции должны быть при высокочастотной части спектра динамических нагрузок.

Увеличение амплитуд динамических нагрузок на фиксированной частоте также приводит к росту ЭДС индукции, однако этот рост замедляется, и кривая напоминает кривую контактной жесткости стыка в функции давления. Характерно, что в процессе сравнительных измерений при постоянной нагрузке в подвижном стыке не обнаружено появления ЭДС индукции. Это доказывает деформационную природу переменного потока магнитной индукции в движущемся контакте при наличии динамических нагрузок.

В экспериментах амплитудные значения разности потенциалов превышали 30 мВ при частоте 50 Гц. Рост максимальных контактных напряжений выше определенного предела (350...400 МПа) приводит к уменьшению электродинамического фактора. При сопоставлении этих данных с результатами измерения электрического сопротивления в контакте между сопряженными деталями замечено, что с ростом давления в контакте сопротивление между деталями снижается, стабилизируясь на минимальном уровне около 0,05 Ом при давлении 350...400 МПа.

Исследованные процессы, по мнению С.А. Лапшина, имеют принципиальное отличие от известных трибоэлектрических или электрохимических явлений, например от эффекта экзоэлектронной эмиссии Крамера или от явления термопары Зеебека, и в реальных условиях работы машины оказываются значительно активнее.

Электродинамический фактор изнашивания пропорционален скорости деформирования контакта и электрическому сопротивлению в контакте сопряженных деталей для материалов, обладающих магнитными свойствами.

Увеличение амплитуд динамических нагрузок приводит к появлению двух конкурирующих процессов. С одной стороны рост амплитуд нагрузок увеличивает колебания потока магнитной индукции, а следовательно, и разности потенциалов на контакте. С другой стороны, повышение контактных напряжений снижает электрическое сопротивление в контакте и разность потенциалов на них. Таким образом, наиболее благоприятными с точки зрения электродинамического фактора оказываются высокочастотные динамические нагрузки с малыми амплитудами, особенно при ограниченной постоянной составляющей нагрузки.

На основе исследований электродинамического фактора изнашивания для повышения долговечности деталей узлов машин, работающих в условиях динамического нагружения, рекомендуется:

снижение динамических нагрузок в высокочастотной части спектра (выше 20 Гц) и создание постоянных контактных напряжений 300... 350 МПа;

создание остаточных напряжений сжатия в деформируемом поверхностном слое;

выравнивание давления и снижение электрического сопротивления в контакте на основе ИП при трении;

применение электропроводящих смазочных материалов;

применение шунтирующей электропроводной перемычки между деталями, работающими с малыми взаимными перемещениями;

использование так называемых протекторов — компенсаторов анодной поляризации в зоне контакта из материалов, более активных в ряду Вольты.

Некоторые из указанных мероприятий были реализованы С.А. Лапшиным в тракторостроении. В результате удалось повысить долговечность шлицевого соединения вала муфты сцепления в 3,5 раза, а карданных передач в 3...5 раз.

По-видимому, электродинамический фактор изнашивания должен влиять на поведение водорода в зоне фрикционного контакта. Этот вопрос требует специального исследования.

Глава 5. ВИДЫ РАЗРУШЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ И РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАШИН

Формирование изнашиваемой поверхности происходит в результате суммирования различных по интенсивности и видам элементарных актов разрушения и изменений механических и физико-химических свойств материала под воздействием внешних факторов (среда, температура, давление, вид трения, скорость относительного перемещения поверхностей и др.). Совокупность явлений в процессе трения определяет вид изнашивания и его интенсивность. Вследствие разнообразия исходных материалов деталей пар трения и условий их службы виды изнашивания чрезвычайно разнообразны. Однако, опуская в каждом отдельном случае несущественные частности, можно попытаться изнашивание деталей и рабочих органов машин свести к небольшому числу видов, т.е. дать их классификацию, что настоятельно необходимо для разработки соответствующих методов борьбы с износом.

Одну из первых классификаций видов изнашивания предложил А.К. Зайцев [1]. Известен ряд других классификаций, различающихся теми или иными признаками. Принципиальное значение в вопросе классификации имело высказанное Б.И. Костецким положение о ведущем и сопутствующих видах изнашиваниях [2]. Ведущий вид — это преобладающий по своему качественному и количественному проявлению процесс в общей совокупности с другими сопутствующими процессами изнашивания поверхностей при трении. Положение о ведущем виде изнашивания делает перспективным разработку классификации.

Вид изнашивания можно установить в первом приближении по такому внешнему признаку, как вид поверхности трения. Для полного суждения может потребоваться анализ состава, физических и механических свойств тонких поверхностных слоев.

В эксплуатации машин встречаются повреждения трущихся (рабочих) поверхностей деталей, вызванные действием газов или жидкостей, например, эрозионное разрушение рабочих кромок золотников или кавитационное разрушение кранов гидравлических систем. Эти и некоторые другие виды повреждений не относятся к износу в обычно понимаемом смысле. Однако, руководствуясь практической целесообразностью, мы полагали важным наряду с износом рассмотреть и другие виды эксплуатационных повреждений. Исходя из этого разрушения рабочих поверхностей деталей и рабочих органов машин, связанные с процессом трения, классифицированы по видам, рассмотренным в следующих главах: водородное изнашивание; абразивное изнашивание; окислительное изнашивание; изнашивание вследствие пластической деформации; изнашивание вследствие диспергирования; изнашивание в результате выкрашивания вновь образуемых структур; коррозионное, кавитационное, эро-

зионное изнашивание; коррозионно-механическое изнашивание в сопряжениях; изнашивание при схватывании и заедании поверхностей; изнашивание при фреттинг-коррозии; трещинообразование на поверхностях трения; избирательный перенос [3].

Вид повреждения не является присущим для данной пары трения, а зависит в общем от условий ее работы. Изменение их приводит к изменению вида изнашивания или разрушения рабочих поверхностей.

На рис. 5.1 представлен график износа армко-железа по армко-железу при трении без смазочного материала на воздухе при постоянном давлении в зависимости от скорости скольжения по данным Е.М. Швецовой и И.В. Крагельского [4]. При скорости скольжения 0,9 м/с интенсивность изнашивания уменьшается в 500...600 раз, расчетная температура контактов составляет около 900°С. Эта скорость скольжения является критической. При меньших скоростях окисные пленки не успевают образоваться, в результате схватывания наблюдается глубинное вырывание. С повышением скорости скольжения растет температура контактов; так как при температуре 900°С скорость окисления железа возрастает скачкообразно, образующиеся окисные пленки изолируют металлические поверхности, схватывание прекращается, и при дальнейшем возрастании скорости скольжения изнашивание становится окислительным.

Подобное влияние имеет давление в парах трения. С ростом его увеличивается число пятен контакта и усиливается при граничной смазке и при отсутствии смазочного материала молекулярное взаимодействие поверхностей. Интенсивность изнашивания несколько возрастает, но в общем она не пропорциональна росту давления, так как последнему не пропорциональна фактическая площадь контакта. Это справедливо до критического давления, при котором взаимодействие поверхностей начинает проявляться по-иному. Например, слабое молекулярное взаимодействие при диспергировании переходит в схватывание.

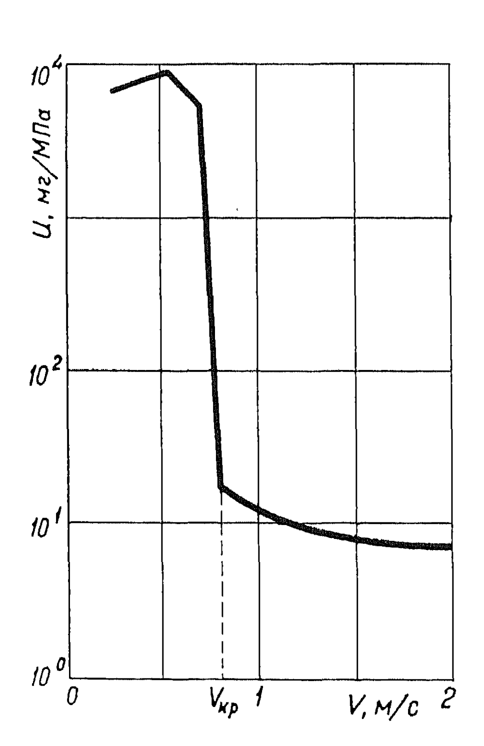


Рис. 5.1. **Изменение износа армко-железа по армко-железу в зависимости от скорости скольжения**

Критическую скорость скольжения и критическую нагрузку называют критическими точками. Эти точки влияют на вид изнашивания не непосредственно, а через температуру. При трении с граничной смазкой наличие критических точек связано с критической температурой прочности граничного слоя смазочного матери-

ала. При трении с полужидкостной и жидкостной смазкой критические точки определяют переход от одного вида трения к другому.

На рис. 5.2 приведена зависимость интенсивности изнашивания пары сталь 45 — сталь 45 при трении без смазочного материала и давлении 1 МПа от скорости скольжения, полученная Б. И. Костецким, который объясняет образование различных видов изнашивания стали 45 в зависимости от скорости скольжения различием количества кислорода, насыщающего при трении поверхностные слои. В области *2* его количество возрастает в 30...100 раз (0,52% O_2) по сравнению с исходным содержанием, равным 0,019%. В области 1 кислорода содержится 0,034%, а в области *3* — 0,065%.

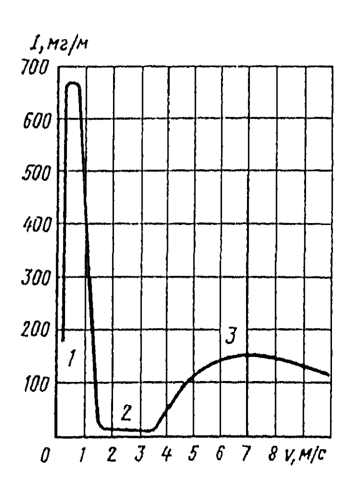


Рис. 5.2. **Зависимость интенсивности изнашивания стали 45 по стали 45 от скорости скольжения:** *1* — область изнашивания при схватывании; *2* — область механохимического изнашивания; *3* — область изнашивания при схватывании при повышенной температуре

Остановимся на конкретных деталях. У подшипников качения возможны такие виды повреждения рабочих поверхностей, как контактная усталость, абразивный износ, водородный износ, фреттинг-коррозия, пластическая деформация, электрохимическая коррозия, задир и электрическая эрозия. Большинство из этих повреждений возможно и на боковых поверхностях зубьев колес.

Поскольку отдельные участки поверхности трения могут пребывать в различных условиях смазки, воздействия внешней среды, давления и пр., то на одной и той же поверхности могут располагаться участки с различными видами повреждений (рис. 5.3).

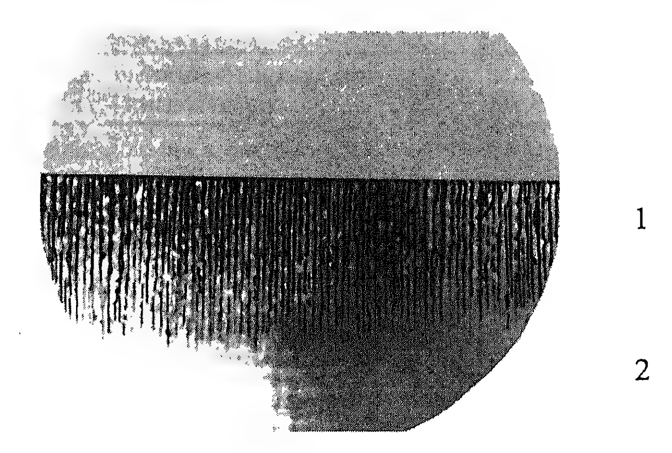


Рис. 5.3. **Учачиок поверхностн трения золотника у кромки, х10:** *1* – эрозионное повреждение; *2* – диспергирование

Бывает, что поверхность изнашивается в результате взаимодействия с двумя или более поверхностями. Так, цилиндр бесползунной поршневой машины одновременно работает с поршневыми кольцами и юбкой поршня, бандаж вагонного колеса взаимодействует с рельсом и тормозной колодкой. Это влияет на процесс и вид изнашивания и затрудняет выбор материалов.

При некоторых условиях трения одна деталь пары может подвергаться одному виду изнашивания, а другая иному. Это, например, следует непосредственно из приведенных выше результатов испытаний чугуна при трении по хромированной поверхности без смазочного материала. При работе вала по мягкому металлу и смазочном материале, загрязненном твердыми частицами, последние впрессовываются в мягкий металл и вызывают абразивное изнашивание вала, в то время как подшипник изнашивается весьма мало, подвергаясь диспергированию (при повышенной кислотности масла изнашивание подшипника может быть коррозионно-механическим). При работе вала по капролактаму после некоторого незначительного начального износа вала в результате диспергирования продукты износа впрессовываются в пластик, частично обволакиваются им при размягчении от повышенной температуры трения, действуют как абразив; сам капролактам изнашивается вследствие диспергирования.

Некоторые виды изнашивания, например, в результате схватывания или абразивного взаимодействия, могут иметь подвиды, характеризуемые различной формой протекания процесса, интенсивностью, внешними признаками. Естественно, методы борьбы с изнашиванием применительно к отдельным подвидам будут разными. Водородное изнашивание проявляется в большей или меньшей степени во всех видах изнашивания. Действие водорода может выражаться в незначительном увеличении скорости изнашивания того или иного вида, а также в самостоятельном катастрофическом разрушении поверхностей трения.

1. Сущность водородного изнашивания и его механизм

Водородное изнашивание как один из видов износа поверхностей при трении установлен всего 35 лет назад (открытие № 378 [31]). В России к настоящему времени по этому виду износа имеется более 200 опубликованных работ, на западе значительно меньше [7, 21].

Водородное изнашивание возникает в результате кооперативного (синергетического) взаимодействия поверхностных явлений: экзоэмиссии, адсорбции и трибодеструкции, которые приводят к выделению водорода. Совместно с неравновесными процессами, идущими при деформации поверхностного слоя металла, создаются тепловые градиенты, электрические и магнитные поля и поля напряжений. Это приводит к диффузии водорода в металл, концентрации его в подповерхностном слое и ускоренному износу или разрушению этого слоя.

Поясним сказанное. На поверхности при трении возникает экзоэлектронная эмиссия, поставляющая электроны, способные сольватироваться на молекулах воды и разлагать их на кислород и водород. Возможно выделение водорода в результате вторичных реакций трибодеструкции углеводородов (например пластмассы). Внутри поверхностного слоя имеет место образование системы накачки водорода до сверхравновесной концентрации под действием упомянутых градиентов, возникающих при деформировании.

Массовое образование дефектов в деформируемом слое также усиливает концентацию водорода, его молизацию и разрушение металла.

Этапы водородного изнашивания даны в табл. 6.1 [12].

Таблица 6.1

Этапы	Процессы в зоне контакта при водородном изнашивании	Причины, вызвавшие процесс
1	Интенсивное выделение водорода в зоне трения из влаги, смазочного материала, топлива и неметаллического материала трущейся пары	Трение вызвало трибохимическую реакцию
2	Десорбция смазочного материала с поверхности металлической детали	Трение повысило температуру поверхности
3	Адсорбция водорода поверхностью металлической детали	Трение создало условия для адсорбции
4	Диффузия водорода в поверхностные слои металлических элементов трущейся пары, скорость которой определяется градиентами температур и напряжений	Трение создало градиенты температуры и напряжений

Продолжение табл. 6.1

Этапы	Процессы в зоне контакта при водородном изнашивании	Причины, вызвавшие процесс
5	Концентрация водорода на некоторой глубине от поверхности трения в зоне максимальной температуры	Трение создало градиент температуры под поверхностью
6	а) Низкотемпературное хрупкое разрушение поверхностного слоя металлических элементов трущихся пар, насыщенных водородом, в результате образования большого числа трещин в зоне контакта	Сложение напряжений от трения и молизации водорода
	б) Высокотемпературное вязкое разрушение трущегося металла в виде намазывания на контртело в результате ожижения поверхностного слоя	Пересыщение водородом стали при колебаниях температуры нагрева порядка 800...1000°С

Существует ряд особенностей взаимодействия водорода со сталью, связанных с характером внешнего воздействия и двумя формами существования водорода в металле.

Первая диффузионно-активная форма — водород в виде иона растворен в решетке металла и *вторая* – молекулярная форма, здесь водород находится в молекулярном состоянии в дефектах кристаллической решетки.

Диффузионно-активная форма при растворении достигает равновесного значения концентрации для данных температур, напряжений, электрических и магнитных полей. Эта форма обратима и не влияет на хрупкость стали [36].

Молекулярная форма оказывает охрупчивающее действие на сталь и некоторые другие металлы. Переход от растворенной формы к молекулярной зависит от дефектности стали, температуры и особенно сильно от процесса деформирования. Предельная концентрация молекулярной формы зависит от дефектности металла и может достигать пороговой концентрации, вызывающей разрушение.

В зависимости от характера внешнего воздействия возникает то или иное соотношение между двумя формами состояния водорода:

в первом случае коррозионного воздействия происходит постепенный необратимый переход растворенного в равновесной концентрации водорода в сегрегированную (молекулярную) форму;

во втором случае, когда происходит механическое воздействие на конструкцию, водород под действием градиента напряжений концентрируется в зоне максимальных напряжений, где переходит в молекулярную форму и вызывает разрушение [27];

в третьем случае, когда имеется трение и на поверхности, возникают градиенты температур, напряжений, электрические и магнитные поля, происходит образование в поверхностном слое сверхравновесной кон-

центрации водорода, выделившегося (при трении же) из адсорбированной воды, смазки, топлива, пластмассы. Переход из сверхравновесной концентрации в растворенном состоянии в условиях деформирования в молекулярную форму может совершаться почти мгновенно благодаря динамике образования дефектов [54].

Водородный износ, иначе его можно назвать как эффект самоорганизации разрушения поверхностного слоя, состоит в сочетании существенной неравновесности процессов при трении с их кооперативным действием. Кооперативность проявляется в том, что выделение водорода при трении сочетается в совместном действии факторов, способствующих его поглощению поверхностным слоем и разрушению этого слоя. Таким образом, неравновесность процессов приводит к неравновесной концентрации водорода и как следствие к разрушению.

В ряде случаев действие водорода при трении определяет срок службы трущейся детали. Обнаружение среди действующих при трении фактора водорода, влияющего на износ, существенно изменило представление о природе трения и износа. Тепловые, электрические и магнитные явления при трении, которые управляют концентрацией водорода, оказались способны управлять износом. Выяснилась их связь с износом, обусловленная водородом, ранее неизвестная. Так, например, явление экзоэлектронной эмиссии оказалось средством выделения водорода из воды, адсорбированной на поверхности трения, или, например, электрическое поле, возникающее при трении пластмассы, может быть решающим фактором наводороживания сопряженной с ней в паре трения сталью и т.д. Изучение этих явлений вызвало разработку средств борьбы с водородным изнашиванием.

Как известно из инженерной практики, можно получить формулу расчета на износ, но нельзя получить стабильный и приемлемый для практики результат расчета. Если результат расчета износа отличается от действительного износа на порядок, то для практики такой результат расчета не нужен. В действительности же интенсивное наводороживание поверхностного слоя может привести не только к быстрому его износу, но и к мгновенному разрушению поверхностного слоя и, таким образом, подтвердить мнение, что расчет без учета наводороживания осуществить трудно. Этим объясняется отсутствие апробированных методов расчета на трение и износ.

Среди факторов, влияющих на износ при трении, наводороживание является превалирующим, особенно для деталей, работающих во влажном климате. В этом случае водородное изнашивание преобладает над другими видами изнашивания.

Соотношение между водородным изнашиванием и собственно износом при граничной смазке было бы велико, если бы не адсорбция ПАВ, вытесняющих водород с поверхности. ПАВ содержится в ряде масел и смазок; они также могут образовываться в процессе трибодеструкции на контакте. Торможение процесса проникновения водорода в сталь может осуществляться покрытием активных участков поверхности слоем нейтральных молекул, например, оксида.

Влияние водорода на износ зависит от ряда факторов и в первую очередь от индивидуальных свойств защитных покрытий. В случае, например, воздействия паров воды, разлагающихся на контакте, разрушительное действие водорода усиливается линейно с ростом концентрации паров воды на поверхности трения.

Максимум адсорбции водорода на железе находится в зоне 70...100°С, когда начинается десорбция ряда компонентов смазки, которая заканчивается около 120°С. Водород же продолжает адсорбироваться до 400°С и более. Поэтому необходимые для проникновения в сталь водорода свободные адсорбционные центры при температуре ниже критической оказываются большей частью занятыми и водород проникает лишь в небольшом количестве. В процессе десорбции смазки водород получает возможность занять большее число адсорбционных центров и поступает в поверхностный слой в значительно больших количествах. Концентрация его в стали быстро возрастает до сверх равновесной. Одновременно растет количество дефектов при деформировании и ускоряется переход водорода в молизованную форму. Повторение циклов трения вызывает эффект накачки, продолжающийся до тех пор, пока внутреннее давление не вызовет разрушение стали по всем развивающимся и соединившимся трещинам.

Создающаяся при трении одновременно с тепловой электрическая неравновесность, имеющая много форм, и в частности выражающаяся в явлении экзоэлектронной эмиссии, делает свою часть работы. Экзоэлектроны гидратируются на молекулах воды (или других водородсодержащих материалах), разлагая их на водород и кислород благодаря туннельному эффекту [39, 45].

Контакт поверхностей при трении способствует проявлению каталитических свойств металла и осуществлению реакций выделения водорода из смазочного материала, пластмассы и других веществ. В работе [20] показано, что существует большое число путей выделения водорода кроме гидратации электрона.

За последнее время в литературе появились работы по влиянию электрического и магнитного полей на изнашивание [42, 43]. Существенное влияние оказывает вибрация, особенно с большой частотой и малыми амплитудами. Эти работы позволяют проследить связь указанных явлений с миграцией водорода в поверхностном слое.

Атом водорода магнитен, а протон электрически заряжен, что обуславливает связь электрических явлений при трении с накоплением и миграцией водорода под действием магнитных и электрических полей. Процессы переноса вызываются силами, действующими на внедренные атомы водорода. Сила электропереноса возникает при наличии электрического тока и феноменологически определяется эффективным зарядом Z^* [9]:

$$\bar{F} = -e\,Z^*\mathrm{grad}\,\Phi\,, \qquad (1)$$

где e — элементарный положительный заряд, grad Φ – приложенное электрическое поле, вызывающее электрический ток. Величина eZ^* характе-

ризует электрический заряд, на который при наличии внешнего поля действовали бы те же силы, что и на атом водорода, внедренный в металл. Согласно этому определению, положительный или отрицательный эффективный заряд указывает на то, что действующая сила направлена соответственно к катоду или аноду.

Аналогично электропереносу, сила теплопереноса возникает при наличии градиента температуры — grad T; она определяется теплотой переноса O^*:

$$F = -O^* \text{grad } T/T . \qquad (2)$$

Положительные и отрицательные значения теплоты переноса отвечают силам, направленным соответственно в сторону более холодных или более теплых частей изделия. Водород движется в изделии в более нагретую сторону. На этом основан процесс обезводороживания изделий, например хромированных силовых болтов самолетов. Их нагревают в термопечи до температер 200°С, а иногда и до более высоких температур — 350...400°С и выдерживают 20 мин.

В случае одновременного действия электрического поля и градиента температуры на атомы водорода имеет место линейная суперпозиция сил (1) и (2).

Отсюда следует, что электрические, магнитные, вибрационные и тепловые явления при трении влияют на износ поверхностного слоя как силы, управляющие движением и концентрацией водорода. Противоположная направленность электропереноса и теплопереноса будет снижать износ, совместное действие в одном направлении – увеличивать.

Рассматривая структуру системы трения в целом можно подразделить ее на гидродонорную и гидроакцепторную подсистемы. Гидродонарная состоит в обеспечении экзоэлектронами молекул воды или углеводородов, адсорбированных на поверхности, которые, разлагаясь, выделяют водород.

Гидроакцепторная подсистема состоит в поглощении выделившегося водорода поверхностным слоем в результате возникновения в этом слое внутреннего источника тепла и электрического потенциала при его деформировании [20]. Кроме тепла и электричества в этой зоне возникают напряжения и происходит возрастание количества дефектов, способных служить ловушками для водорода, что обуславливает необратимость и создает сверхнеравновесную концентрацию.

В зависимости от ряда причин, например, от характера нагружения, трибодеструкции и адсорбции тех или иных веществ, конструкции узла трения степень наводороживания может существенно изменяться. В соответствии с этой степенью будет происходить переход от замедленного разрушения поверхностного слоя к хрупкому мгновенному разрушению.

Область проявления водородного износа обширна. Практически все трущиеся поверхности стальных и чугунных деталей содержат повышенное количество водорода и, следовательно, имеют повышенный износ. Наличие в воздухе паров воды создает благоприятные условия для водородного изнашивания, не говоря уже о разложении в зоне контакта смазки, топлива или пластмассы.

2. О туннельном эффекте при трении (гидродонорная система)

Туннельный эффект рассматривается в связи с тем, что в основном благодаря ему при трении происходит постоянное выделение водорода.

Среди различных электрических явлений при трении, играющих роль как ускорителей, так и замедлителей процесса проникновения водорода в сталь, одному из них, как отмечено ранее – экзоэлектронной эмиссии, принадлежит особая роль. В результате экзоэлектронной эмиссии, интенсивность которой зависит от многих условий и режимных факторов трения, возникают свободные электроны [18].

Чтобы электрон попал из металла на поверхность, ему нужно преодолеть потенциальный барьер. Электрон находится на определенном энергетическом уровне в потенциальной яме, при вылете совершает работу против сил двойного электрического слоя и сил электрического слоя внутри металла, а также сил электрического изображения. При трении в условиях пластического и упругого деформирования и образования дефектов слабо связанные электроны в возбужденных атомах решетки забрасываются на более высокие энергетические уровни, кинетическая энергия свободных электронов при этом увеличивается.

Трение, повышая энергию решетки металла, снижает работу выхода электронов и в зависимости от среды и режима нагрузки вызывает возникновение экзоэлектронной эмиссии.

Возникновение туннельного эффекта связано с квантовыми свойствами частиц, с тем что их движение имеет волновой характер. Благодаря этому эффекту химическая энергия, необходимая для протекания некоторых реакций (в том числе и выделения водорода), снижается на порядки.

Туннельный эффект в простейшем случае состоит в том, что частица, первоначально локализованная по одну сторону потенциального барьера – области, где потенциальная энергия частицы превышает ее полную энергию, может с отличной от нуля вероятностью проникнуть через барьер и быть обнаруженной по другую его сторону. Туннельный эффект – явление квантовой природы, не имеющее аналога в классической механике; оно лежит в основе многих важных физических процессов в том числе и в основе реакции выделения водорода при гидратации.

Эмитированные из металла при трении электроны имеют первоначально избыточную энергию, которую они быстро теряют путем столкновения с молекулами воды, а затем гидратируются или вступают в химическую реакцию с присутствующими акцепторами. В гидратированном состоянии электрон существует только одну миллисекунду, после чего молекула воды распадается на водород и гидроксильный ион:

$$e\,(H_2O) + H_2O \rightarrow OH + H$$

Обратная реакция практически никогда не идет самопроизвольно [39].

Из большого числа окислительно-восстановительных реакций, идущих при трении различных материалов с выделением водорода, приведенная выше является наиболее производительной.

Частичное подавление процесса экзоэлектронной эмиссии достигается путем использования модификаций избирательного переноса. Так, при применении металлоплакирующих смазок снижаются удельные давления, прекращается деформация основного металла, возрастает электропроводность зоны контакта.

В связи с выделением водорода из адсорбированной воды влажность воздуха оказывает сильное воздействие на интенсивность изнашивания металлов. Это имеет большое значение для машин массового применения, эксплуатирующихся на открытом воздухе, особенно для нашей страны с обширными районами повышенной влажности. Это прежде всего рельсы и колеса железнодорожного транспорта, машины сельскохозяйственного производства, дорожно-строительные машины, тормоза автомобилей и др.

3. Источники наводороживания

Следует отметить, что водородный износ может быть вызван не только тем водородом, который образуется при трении, но и водородом, который может образовываться при различных технологических процессах. Отметим некоторые из них.

При выплавке стали в доменном производстве из влаги дутья (водяного пара) в результате его разложения под действием углерода образуется водород, который и попадает в сталь.

При термической обработке, например, в результате азотирования (при диссоциации аммиака) выделяется водород, который диффундирует в сталь.

Наводороживание стальных изделий происходит при электроосаждении хрома, кадмия, цинка и никеля (повторим, что одним из способов удаления водорода из гальванических покрытий является термообработка изделий при 200...400°С).

Во время удаления окалины, продуктов коррозии стальные изделия подвергают травлению в кислоте. Погружение стали в раствор кислоты приводит к растворению железа на анодных участках и выделению водорода на катодных участках с одновременным его внедрением в сталь. В результате накопления газообразного водорода на поверхности детали могут быть даже вспучивания. Степень наводороживания при травлении зависит от многих факторов – состояния стали и особенно наличия в растворе ничтожных количеств (следов) серы, фосфора, мышьяка, селена (так называемых “отравителей”), которые способны замедлять (или “отравлять”) реакции химической десорбции и таким образом увеличивать площадь, покрытую водородом и собственно абсорбцию. Поэтому на практике вопрос выбора ингибитора должен быть тщательно продуман, иначе может иметь место повышение абсорбции водорода.

При фосфатировании водород внедряется в сталь. Здесь следует регулировать в ванне содержание свободной кислоты и определенных окислительных агентов и тем самым можно существенно понизить количество адсорбированного водорода.

Атмосферная коррозия металла может вызвать абсорбцию водорода в том случае, если она протекает в промышленной атмосфере, содержащей сернистый ангидрид и кислую сернокислую соль.

Водород, проникший в сталь (этот водород называют биографическим), в процессе трения будет постепенно диффундировать к поверхности трения и, молизуясь в дефектах, вызывать повышенный износ.

В.Я. Матюшенко и М.А. Андрейчик [2] определили влияние различных технологических операций на наводороживание стальной поверхности. Результаты экспериментов приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Технологическая операция	Содержание водорода в см^3 на 100 г
Токарная обработка без СОЖ	0,4
Токарная обработка с СОЖ	5,6
Закалка	12,6
Отпуск	6,8
Цементация	15,4
Закалка после цементации	18,8

Как будет показано далее технологически приобретенный водород снижает нагрузку стали до заедания и уменьшает ее износостойкость.

4. К истории открытия водородного изнашивания

При анализе причин одной из аварий самолета А.А. Поляковым и Д.Н. Гаркуновым было обнаружено явление переноса материала стального ротора топливного насоса на бронзовый золотник. Причина такого переноса очень твердого и прочного материала (закаленной стали) на мягкий материал — бронзу — нами не была известна и в литературе по схватыванию металлов и массопереносу мы не нашли какого-либо объяснения.

Мы знали о негативном действии водорода на механическую прочность стальных деталей; по этому вопросу была опубликована обширная литература. В связи с таким неординарным случаем переноса металлов у нас появилось предположение, что это могло произойти в результате действия водорода. Но не было прямых этому подтверждений. Но самое главное, такое предположение противоречило установившемуся мнению о том, что само трение является процессом обезводороживания. Считалось, что максимальная температура при трении находится на поверхности и водород, имеющийся в детали, будет двигаться в сторону высокой температуры и затем десорбироваться с поверхности. На этом был основан процесс обезводороживания, восстанавливающий механические свойства стальных деталей после их хромирования. Хромированные трущиеся детали, например цилиндры авиационных поршневых двигателей, не подвергали обезводороживанию, так как считали, что такое обезводороживание произойдет в процессе их работы.

Было твердо установлено, что передача тепла происходит по нормали от мест с большей температурой к местам меньшей температуры. Наибольший перепад температуры происходит в направлении нормали к площади, образованной единичным выступом.

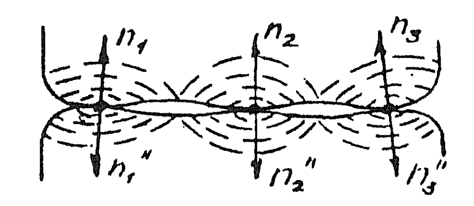


Рис. 6.1. **Контактирование двух шероховатых поверхностей:**
n — единичные нормали

На рис. 6.1 показано взаимодействие двух поверхностей и направление единичных векторов, совпадающих с направлением нормали к единичной площадки контакта [23].

Очевидно, в общем случае направление общей нормали *n* к контакту не совпадает с единичными векторами. Температурное поле, распространяясь в глубь материала, приводит к изменению его механических свойств в тонком поверхностном слое. Величина теплового потока зависит от работы трения и величины площадки, на которой она генерируется [23]. В связи с изложенным вопрос о влиянии водорода на трибосистему в практике и технической литературе не ставился. По-видимому, первой работой о влиянии водорода на уменьшение износостойкости стальной детали была работа, опубликованная в 1960 г. [11]. В ней говорилось, что наводороживание увеличивает дефектность (число "слабых мест") поверхностного слоя и снижает его износостойкость. В работе не утверждалось, что в процессе трения детали могут наводороживаться.

Только в последние годы теоретически А.В. Кудинов [24], а затем экспериментально В.Я. Матюшенко, Г.П. Шпеньков и Д.Н. Гаркунов установили, что при тяжелых режимах трения максимальная температура образуется на некоторой глубине от поверхности трения. Это создает условия, при которых водород, если он будет адсорбирован на поверхности детали, под действием температурного градиента диффундирует в глубь поверхности, там концентрируется, вызывает охрупчивание поверхностных слоев и усиливает изнашивание.

Рассмотрим нестационарную температурную задачу трения по В.А. Кудинову. Представим стержень прямоугольного сечения, прижатый давлением *p* к поверхности вращающегося диска (рис. 6.2).

Предполагаем, что материал диска обладает большей прочностью; при этом в поверхностном слое стержня возникают пластические деформации, одинаковые по толщине, а значения температур плоскостей, ограничивающих поверхностный слой, равны между собой.

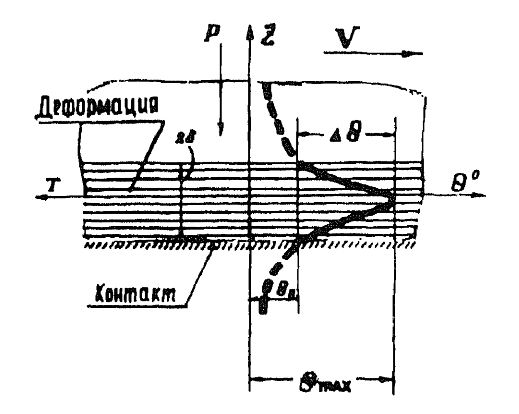


Рис. 6.2. **Изменение температуры Θ по нормали z к поверхности трения (в поверхностном деформируемом слое)**

Математическое описание такой задачи сводится к решению одномерного уравнения теплопроводности для бесконечного слоя толщиной h, внутри которого на единицу объема выделяется количество теплоты q_v:

$$\rho c d\Theta/dt - \lambda d^2\Theta/dz^2 = q_v, \tag{6.1}$$

где ρ — плотность материала слоя; c — теплоемкость; Θ — температура слоя; λ — коэффициент теплопроводности; z — начало координатной оси расположено на средней поверхности слоя; t — время.

Методика вычисления функции тепловыделения q_v для рассматриваемого слоя изложена в работах М.П. Савицкого. В соответствии с расчетной схемой краевые и начальные условия принимаем в следующем виде (предполагается, что в начальный момент температура окружающей среды и слоя равна Θ_0):

$$\Theta\Big|_{t=0} = \Theta_0;\ \lambda\frac{d\Theta}{dz}\Big|_{z=+h/2} = -\alpha(\Theta-\Theta_0);\ \lambda\frac{d\Theta}{dz}\Big|_{z=-h/2} = \alpha(\Theta-\Theta_0), \tag{6.2}$$

где α — коэффициент теплопередачи.

Интегрируя уравнение (6.1) по толщине с учетом краевых условий, получим дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\frac{d\Theta}{dt} + A\Theta = \frac{2\alpha_0 + hq_v}{h\rho c} = B, \tag{6.3}$$

где $A = 2\alpha/(h\rho c)$.

Решение уравнения (6.3) с учетом начального условия (6.2) имеет вид:

$$\Theta = e^{-At}\Theta_0 + \frac{B}{A}(l - e^{At}). \tag{6.4}$$

Для границы слоя $z = h/2$ формула (6.4) для стационарной температуры совпадает с данными, полученными ранее В.А. Кудиновым:

толщина слоя $h = \delta;\ \Theta\big|_{z=h/2} = \Theta_0 + \dfrac{hq_v}{2\alpha}$.

Полученное выражение позволяет с достаточной для практических приложений точностью определить время выхода на стационарный режим в зависимости от параметров, входящих в постоянную A, а также максимальную температуру разогрева слоя. По данным В.А. Кудинова, перепад температур по тепловыделению при торможении современного самолета, может составить 400°С для стали.

Как уже отмечалось, экспериментальное подтверждение о наличии максимума температуры под поверхностью трения было выполнено позднее [21, 26, 28, 49]. Испытанию подвергалась теплостойкая пластмасса

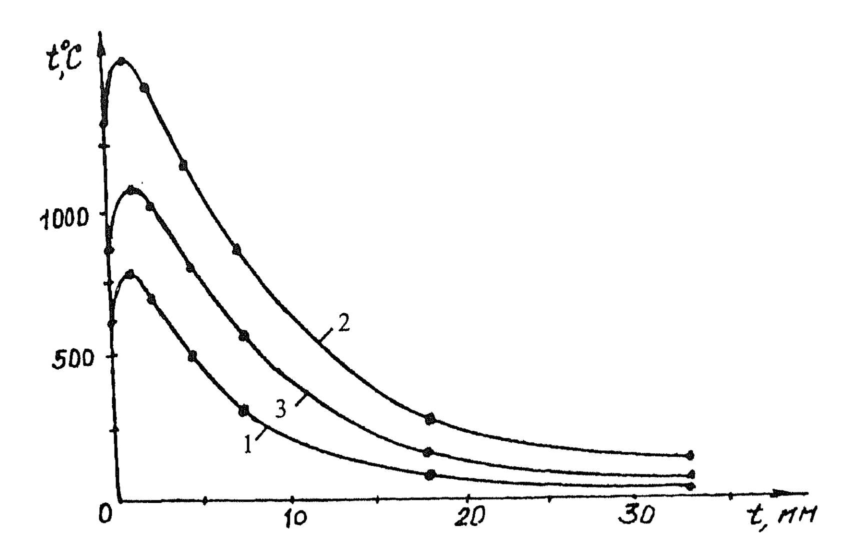


Рис. 6.3. **Кривые распределения температуры по глубине от поверхности трения стального образца при нагреве трением:**
1 – в течение 5 с; *2* – 20 с; *3* – 10 с

паре со сталью. Распределение тепла по глубине стального образца в процессе трения показано на рис. 6.3.

Таким образом установлено, что трение может не только обезводородить поверхность детали (обезводороживание происходит при легких режимах трения, например при полировании); при тяжелых же режимах трения максимальные температуры образуются под поверхностью трения (на некоторой глубине (рис. 6.4), что будет способствать продвижению водорода с поверхности в глубь металла.

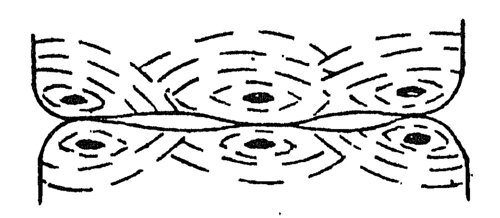


Рис. 6.4. **Наличие зон с максимальной температурой под поверхностью трения (тяжелые условия трения)**

В случае циклического трения, например при взаимодействии колеса с рельсом, будет происходить своеобразная накачка водородом контактирующихся поверхностей деталей.

5. Влияние водорода на прочность. Водородное охрупчивание

Первой работой, в которой установлено влияние водорода на охрупчивание стали, является исследование Пфейля, опубликованное в 1926 г. С тех пор по этому вопросу было опубликовано множество работ. По водородной хрупкости имеется ряд монографий, в которых обобщен большой экспериментальный материал. Основные выводы, сделанные П. Коттерилом, по влиянию водорода на объемную прочность стали сводятся к следующему:

— водород не оказывает существенного влияния на упругие характеристики железа и стали;

— при содержании водорода до 0,1 см^3/100 г твердость стали, не меняется, хотя предел прочности уменьшается;

— разрушающее напряжение снижается пропорционально росту концентрации водорода;

— характеристики пластичности (удлинение и сужение) снижаются пропорционально повышению концентрации водорода вплоть до 5 см^3/100 г; при дальнейшем увеличении содержания водорода пластичность остается на низком уровне;

— степень охрупчивания стали под влиянием водорода уменьшается с повышением скорости деформации; при ее предельно высоком значении (испытании на удар) водород не вызывает охрупчивания стали;

— охрупчивание стали под влиянием водорода проявляется в интервале температур —100...+100°С; наибольшая степень охрупчивания наблюдается при нормальной и несколько более низкой температуре;

— для осуществления явления охрупчивания необходимо наличие растягивающих напряжений;

— в присутствии водорода характер разрушения стали изменяется:

вместо типичного для пластичного металла вязкого разрушения наблюдается хрупкое разрушение (обычно путем разрыва по плоскостям спайности);

— интенсивность охрупчивания металла под влиянием водорода зависит от вида обработки; сталь особенно склонна к водородной хрупкости в закаленном состоянии; вероятность проявления водородной хрупкости повышается также в результате наклепа;

— водород вызывает преждевременное хрупкое разрушение высокопрочных легированных сталей при статическом нагружении;

— водород не влияет на свойства металла в ненапряженном состоянии; удаление водорода из стали до ее деформирования обеспечивает полное сохранение пластичности; по-видимому, для проявления водородной хрупкости необходимо присутствие водорода, способного диффундировать в процессе деформации;

— если водород распределяется по образцу неравномерно, то области, богатые водородом, будут обладать наименьшей пластичностью при испытании на растяжение; в этих областях начнется преждевременное разрушение.

Указанные особенности влияния водорода на свойства стали установлены экспериментально при выявлении влияния водорода на объемную прочность стальных деталей. Можно с большой достоверностью предполагать, что эти положения в некоторой степени будут справедливы для стали в процессах трения и изнашивания.

О механизме водородного охрупчивания. Несмотря на обширную литературу с описанием экспериментальных работ, единой точки зрения на механизм водородного охрупчивания нет. Это объясняется многочисленностью факторов, влияющих на этот механизм, сложностью и недоста-

точной изученностью отдельных элементарных физико-химических процессов.

Различают несколько видов водородного охрупчивания. Б.А. Калачев делит их на две группы: охрупчивание первого рода, обусловленное источниками, которые имеются в исходном металле вследствие повышенного содержания водорода; охрупчивание второго рода, обусловленное источниками, которые развиваются в металле с повышенным содержанием водорода в процессе пластической деформации. Охрупчивание первого рода является обратимым и усиливается с повышением скорости деформации; охрупчивание второго рода развивается при малых скоростях деформаций и может быть как обратимым, так и необратимым.

Теории водородного охрупчивания можно разделить на четыре группы.

1. Теория давления молекулярного водорода, согласно которой охрупчивание есть результат давления молекулярного водорода в макро- и микропустотах, а также в трещинах внутри металла. Давление возникает в результате молизации атомарного водорода.

2. Адсорбционные гипотезы, объясняющие снижение разрушающего напряжения вследствие уменьшения поверхностной энергии внутри трещин при адсорбции водорода (водород действует как поверхностно-активное вещество).

3. Теория взаимодействия водорода с решеткой металла; водород является разновидностью дефекта, понижающего прочность когезионной металлической связи.

4. Теории, основанные на взаимодействии водорода с дислокациями; водород производит блокирующее действие на дислокации.

Для защиты металлов от воздействия водорода при повышенных температурах и давлениях рекомендуются следующие методы [3]: введение в сталь сильных карбидообразующих элементов (хром, молибден, ванадий, ниобий и титан) для стабилизации карбидной составляющей и предупреждения обезуглероживания стали (процесс обезуглероживания описывается реакцией $Fe_3C + 2H_2 \rightleftarrows 3Fe + CH_4$, происходит своеобразная коррозия стали); плакирование или футеровка стали металлами, имеющими более низкую водородопроницаемость (например медь, серебро, алюминий, сталь 08Х13, 12Х18Н10Т и др.).

М. Смилковский отмечает, что если подключить к мембране положительный электрический потенциал по отношению к вспомогательному электроду, то проникновение водорода полностью тормозится. При подключении отрицательного потенциала около 1000 В наводороживание увеличивается в несколько раз. Водород проникает в металл преимущественно в виде протона.

Имеются вещества, малые добавки которых в металл способствуют проникновению в него водорода. Это могут быть соединения серы, сурьмы, мышьяка, селена, примеси сероводорода и др. Поэтому наличие указанных веществ в стали крайне нежелательно.

Существуют также ингибиторы проникновения водорода в металл. Многие полярные органические соединения тормозят проникновение

водорода в металлы при коррозии и катодной поляризации. Так, дибензилсульфоксид при сильно отрицательных потенциалах катода восстанавливается в дибензилсульфид и прочно адсорбируется на поверхности металла. Механизм действия органических ингибиторов проникновения водорода состоит в том, что при электролизе ионы водорода разряжаются на внешней поверхности адсорбированного слоя органических молекул, в результате нарушается непосредственный контакт ионов водорода с поверхностью.

6. Отличия водородного изнашивания от водородного охрупчивания

Водородное изнашивание не имеет общих черт с водородным охрупчиванием стали ни по источникам наводороживания, ни по интенсивности и характеру распределения водорода в стали, ни по характеру разрушения. Водородное изнашивание связано только с процессом трения и обусловлено трением. Для него характерны высокая локальная концентрация водорода в поверхностном слое стали, возникающая из-за больших градиентов температуры и напряжений при трении, которые обусловливают накопление водорода и особый характер роста трещин, приводящий к сплошному разрушению слоя стали.

Водородное изнашивание представляет собой эволюционный процесс, направленный на разрушение трущихся поверхностей. Трение создает условия для образования диффузионно-способного водорода из смазочного материала, топлива, пластмассы, паров воды и других материалов. Далее трение обеспечивает адсорбцию водорода на поверхность трущейся детали (стальной или чугунной) путем создания ювенильных поверхностей. Трение благодаря деформации тонких поверхностных слоев образует гидридофильную зону на стальной или чугунной поверхности детали, которая своеобразно "впитывает" водород. В результате трения диффузионно-способный водород концентрируется на некоторой глубине от поверхности трения, где располагается максимум температуры при трении. Глубина концентрации водорода зависит от режимов трения и участвующих в нем материалов. Чем тяжелее режим трения, тем глубже находится максимум температуры. Все указанные выше процессы отличают водородное изнашивание от водородной хрупкости металлов.

Последним этапом водородного изнашивания является своеобразное разрушение стальной поверхности. Под ней одновременно образуются многочисленные трещины, которые, сливаясь, могут мгновенно превратить поверхностный слой детали в порошок. При водородном охрупчивании образуется и развивается только одна трещина, которая и приводит к разрушению детали. Как видим, и здесь имеется коренное отличие водородного изнашивания от водородного охрупчивания.

При водородном изнашивании концентрация водорода под поверхностью настолько велика, что никакой другой источник наводороживания не может создать и десятой доли подобной концентрации.

Подавляющее большинство методов борьбы с водородным изнашиванием не может быть использовано для снижения интенсивности водородного охрупчивания металлов ввиду принципиальных различий этих явлений. Водородное изнашивание — явление самоорганизующееся, по сложности и масштабам проявления оно превосходит явление водородного охрупчивания. Между тем процессы водородного охрупчивания, а также сходные с ними процессы коррозионного растрескивания сталей и сплавов изучены в большей степени (хотя и не до конца). Это облегчает изучение механизма разрушения стали при водородном изнашивании.

7. Виды водородного изнашивания

Как установлено А.А. Поляковым и автором, имеются два основных вида изнашивания поверхностей стальных и чугунных деталей под воздействием водорода: изнашивание диспергированием и изнашивание разрушением.

7.1. Водородное изнашивание диспергированием (ВИДИС)

При этом виде изнашивания каких-либо изменений в поверхностном слое деталей вследствие обычного износа при диспергировании не наблюдается. Водород усиливает (в зависимости от его количества в поверхностном слое) диспергирование стали или чугуна. На поверхностях трения нет вырывов, задиров, заметного переноса материала с одной поверхности трения на другую; они могут иметь блеск и очень мелкие царапины, которые не видны невооруженным глазом и направлены вдоль направления движения.

При изучении износостойкости наводороженных стальных образцов (наводороживание производилось электролитическим способом) установлено [27], что при незначительном наводороживании износостойкость образцов из стали 45 несколько увеличивается, а при дальнейшем наводороживании падает. Это связано с тем, что при начальном наводороживании повышается твердость стали.

На рис. 6.5 представлена зависимость изменения относительной микротвердости стали (отношение микротвердостей наводороженной стали 45 к ненаводороженной в процентах) от времени наводороживания. Микротвердость увеличивается в первый период (1,5 ч) наводороживания, когда происходит процесс насыщения стали водородом, сопровождающийся упрочнением поверхностного слоя. Далее микротвердость при наводороживании падает и становится меньше исходной. Уменьшение микротвердости стали при насыщении ее водородом свидетельствует о разрыхлении ее поверхностного слоя и снижении износостойкости.

Зависимость количества поглощенного водорода и интенсивности изнашивания стали от времени выдержки в наводороживающей среде приведена на рис. 6.6.

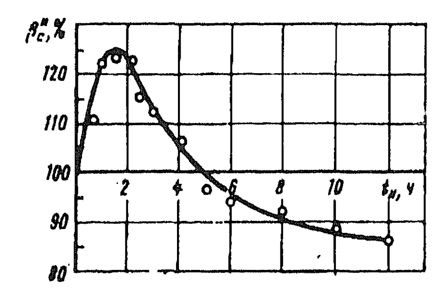


Рис. 6.5. **Изменение относительной микротвердости стали от времени выдержки в наводороживаемой среде**

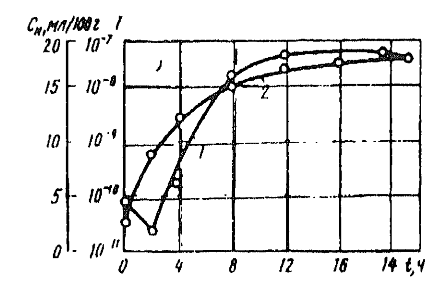


Рис. 6.6. **Зависимость количества поглощенного водорода Сн (кривая 2) и интенсивности изнашивания *I* (кривая 1) от времени выдержки в наводороживающей среде**

Испытания образцов на изнашивание проводили на машине трения 77МТ-1 при возвратно-поступательном движении. Вначале испытывали ненаводороженные образцы. Нижний образец (2×4×6 см) был из стали 45, а верхний (0,5×1,5×3,5 см) из чугуна СЧ21. Наводороживание проводили в 26%-ном растворе серной кислоты по методике, изложенной в работе [27]. Интенсивность изнашивания оценивали величиной $I = m/(LAa\rho)$, где m — масса изношенного слоя; L — путь трения; Aa — номинальная площадь трения образца; ρ — плотность материала.

Исследования показали, что интенсивность изнашивания при наводороживании вначале может уменьшиться на небольшую величину, а в дальнейшем увеличиться на два порядка.

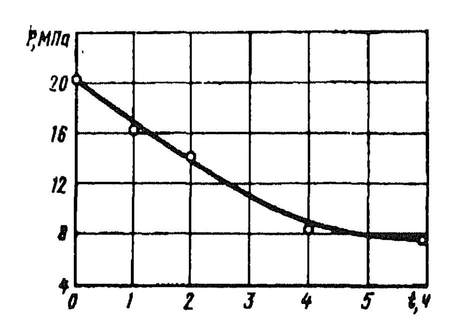


Рис. 6.7. **Зависимость предельной нагрузки до заедания от времени наводороживания стали**

Установлено также, что при наводороживании значительно уменьшается нагрузка до заедания стальных образцов при трении (рис. 6.7). Испытания проводили на машине трения АЕ-5, в которой три стальных образца, расположенные под углом 120°, истирались о плоскую сторону вращающегося диска. Масло подавали каплями в центральную часть диска. Из приведенного графика следует, что наибольшее падение нагрузки до заедания происходит после 4...5 ч наводороживания.

7.2. Водородное изнашивание разрушением (ВИРАЗ)

Этот вид изнашивания имеет специфическую особенность: поверхностный слой стали или чугуна разрушается мгновенно на глубину до 1...2 мкм. Это происходит, когда поверхностный слой накапливает большое количество водорода. Ранее отмечалось, что процесс трения создает условия высокой концентрации водорода в поверхностных слоях стали. Трение десорбирует смазочный материал и водород получает возможность занять большее число адсорбционных центров на поверхности. Концентрация водорода в стали непрерывно возрастает. Водород попадает в зародышевые трещины, полости, межкристальные границы и другие места. При трении происходит периодическое деформирование поверхностного слоя, и объем дефектных мест (полостей) изменяется. Поступающий в полости водород молизуется и, не имея возможности выйти обратно при уменьшении объема, стремится расширить полость, создавая высокое напряжение. Повторение цикла вызывает эффект накопления, продолжающийся до тех пор, пока внутреннее давление в полостях не вызовет разрушения стали по всем развившимся и соединившимся трещинам.

Рассмотрим повреждения различных деталей и узлов трения от ВИРАЗ.

Разрушение стальных подпятников керосиновых насосов. При эксплуатации керосиновых насосов наблюдались случаи катастрофического износа поверхностей стальных закаленных роторов и сопряженных с ними бронзовых золотников. Ротор изготовлен из стали 12ХН3А, твердость поверхности *HRC* 60, твердость золотника из бронзы *HB* 61. Внешне разрушение проявлялось как износ стальной поверхности на глубину 0,03 мм и намазывание микроскопических лепестков стали на поверхность бронзового золотника (рис. 6.8).

Идентичность материала этих лепестков с материалом ротора установлена спектральным анализом. На роторе по всей поверхности трения имелись относительно глубокие кольцевые царапины. На участках золотника, где частиц стали не было, наблюдалось "вымывание" одной из фазовых составляющих бронзы и следы серого налета на поверхности.

Как выяснилось, ротор имел небольшой перекос относительно золотника, что могло привести к повышенной скорости изнашивания поверхностей трения. В керосине, который одновременно служит смазочным материалом для насоса, допускается незначительное количество примесей коррозионно-активных соединений серы (меркаптаны). Вследствие высокой сорбционной способности они могут накапливаться на металлических поверхностях. В обычных услови-



Рис. 6.8. **Участок переноса закаленной стали со стального ротора на бронзовый золотник, ×100**

ях работы эти соединения при допустимом их содержании в керосине не вызывают коррозии. С повышением температуры возникает хемосорбция, физическая адсорбция уменьшается и, следовательно, уменьшается механическое защитное действие адсорбционного слоя. В этих условиях трение приводит к значительному ускорению коррозии. Происходит избирательное анодное растворение медного сплава, образование меркаптидов, выделение водорода на меди и диффузия его в сталь.

Трудности лабораторного воспроизведения этого процесса связаны с необходимостью пропускать через зону трения большой объем керосина, чтобы накопить достаточное количество упомянутых поверхностно-активных соединений.

Золотники топливных насосов, а также лопатки роторов насосов и сопряженные с ними детали не всегда имеют повреждения от водородного изнашивания в виде крупных задиров и микропереноса. Некоторые детали работают в режиме ВИДИС. Однако за несколько часов работы линейный износ трущихся поверхностей может составить 0,5 мм и более (при нормальной работе износ до 0,01 мм).

Повреждения пластмассовых тормозных колодок авиаколес. Перенос чугуна в узлах трения чугун — пластмасса, применяемых в некоторых тормозных устройствах колес самолетов, имеет широкие масштабы. Это является одной из причин частых смен тормозных пластмассовых колодок. На рис. 6.9 представлена колодка из пластмассы после эксплуатации. Рабочая поверхность колодок почти сплошь покрыта тонкой чугунной пленкой. Срок службы таких колодок очень низкий, иногда не превышал 40...50 посадок самолета.

Взамен пластмассы был создан фрикционный материал ретинакс с большей износостойкостью. Однако чугун переносился и на этот материал, хотя и при более высоких температурах и давлениях и в течение более длительного времени, чем при испытаниях колодок из пластмассы. Этим, вероятно, можно объяснить, что срок службы тормозных колодок из ретинакса в несколько раз выше, чем колодок из пластмассы 22 (рис. 6.10).



Рис. 6.9. **Пластмассовая тормозна колодка авиаколеса с намазыванием чугуна (светлые полосы)**

Исследования А.Н. Праведникова показали особую роль водорода в термодеструкции пластмасс. Экспериментально установлено, что энергия активации при термодеструкции пластмасс находилась в пределах 125...300 кДж/моль. Однако для процесса в целом она значительно меньше, что свидетельствовало в данном случае о протекании цепной реакции, при которой должен быть агент-переносчик. Таким переносчиком оказался атомарный водород, который активен и может инициировать разложение органической молекулы. После разложения молекулы пластмассы водород молизуется и в дальнейшем уже менее активная молекула водорода входит в состав летучих продуктов вместе с другими продуктами как примесь. Расчеты А.Н. Праведникова показали, что такая роль водорода возможна даже при небольших его концентрациях.

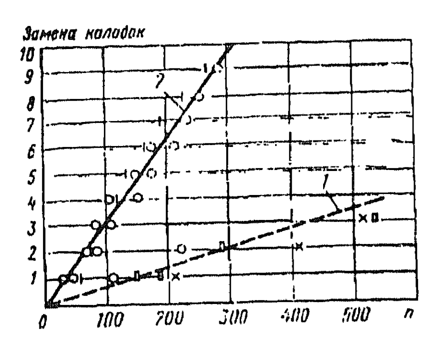


Рис. 6.10. **Срок службы тормозных колодок авиаколес в зависимости от числа посадок самолета *n*:**
1 – колодка из ретинакса; *2* – колодка из пластмассы 22

При отсутствии водорода удалось повысить термостойкость пластмасс до температуры 600°С. Полученные результаты объяснили причины высокой термостойкости органического полимера, известного под названием "черный орлон", который выдерживает температуру до 1000°С. Этот полимер — карбонизированный полиакрилонитрид в своей структуре не содержит ни одного атома водорода.

В процессе термодеструкции при трении обычных пластмасс водород может входить в металл, наводороживая его.

Повреждения пластмассовых тормозных элементов автомобилей. Процессы переноса стали и чугуна на пластмассовые тормозные элементы автомобилей рассматривали А.Г. Георгиевский и М.Н. Олина [15]. При трении асбестосмоляного образца с чугуном, легированным никелем и хромом, при температуре 400...500°С происходит перенос пластмассы на чугун. При дальнейшем повышении температуры на поверхности чугунных образцов наблюдается увеличение толщины неметаллической пленки, которая при температуре 900°С достигает 100 мкм. Пленка неоднородна по строению: прилегающая к металлу часть более светлая, подобна оксидной. В дальнейшем чугун переносится на пластмассу. Предварительно на некоторой глубине от поверхности трения образуется тонкая трещина, которая местами выходит на поверхность. На отдельных участках наблюдается закатывание пластмассы в металлическую поверхность. Чугун переносится несплошным слоем; отделившаяся от основного материала посредством образования трещины часть чугуна хрупко разрушается на отдельные агломераты зерен. В процессе трения происходит охрупчивание чугуна в тонком поверхностном слое.

Позднее перенос чугуна на пластмассовый элемент автомобиля изучали М.М. Бородулин и И.И. Васильев [8]. При намазывании чугуна фрикционные качества пары трения снижаются, а на поверхности контртела образуются глубокие кольцевые выработки. Тормозные барабаны быстро выходят из строя. Явление намазывания в тормозных транспортных средствах было впервые обнаружено при работе тормозных накладок в горных условиях (температурный режим наиболее тяжелый); при работе на равнинной местности на первой стадии эксплуатации это явление остается незаметным. В зависимости от напряженности работы тормозного элемента образуются повреждения как на тормозном барабане, так и на накладке или колодке из фрикционной пластмассы. На поверхности пластмассовой колодки легкового автомобиля в наиболее нагруженной части имеются частицы чугуна в виде небольших вытянутых по направлению движения лепестков размером до 1...1,5 мм^2 (рис. 6.11).



Рис. 6.11. **Частицы чугуна на рабочей поверхности тормозной колодки легкового автомобиля, ×3**

В тормозных устройствах грузовых автомобилей повреждения колодок имеют большие размеры, хотя характер повреждения тот же. Частицы чугуна, перенесенного на колодку грузового автомобиля, показаны на рис. 6.12.

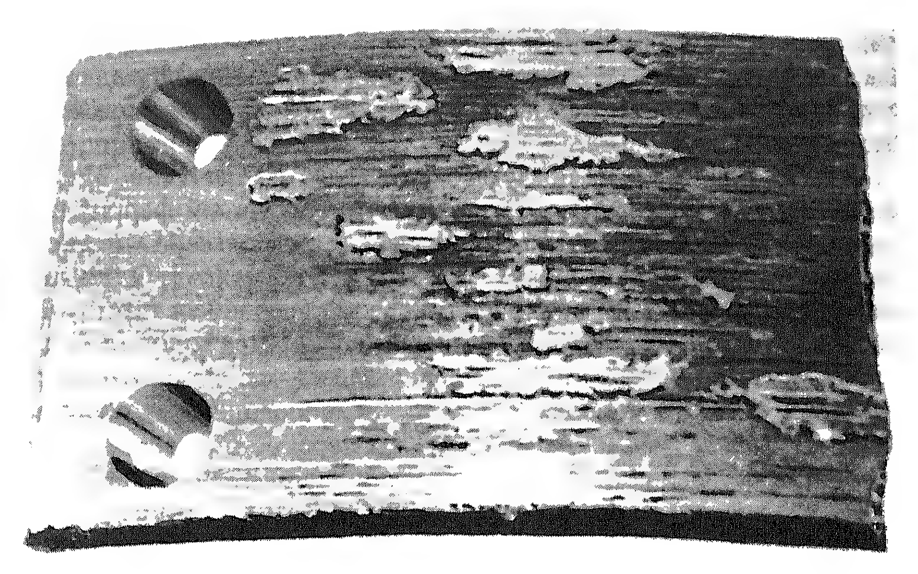


Рис. 6.12. **Участки перенесенного чугуна на колодку тормоза грузового автомобиля**

Повышение хрупкости чугуна при трении по пластмассе можно объяснить только его наводороживанием.

Методика, предложенная В.С. Манцевым, позволяет количественно оценить перенос материала на пластмассу в зависимости от ее состава и режимов трения.

Работы по изучению водородного изнашивания в тормозных устройствах проводят в Польше [57]. В результате тонких физико-химических методов исследования (хроматографический, термогравиметрический, термический и др.) получена исчерпывающая информация о реакциях, происходящих в зоне контакта на различных температурных уровнях. При трении стали о композитный материал на основе смол последний подвергается механической и термической деструкции и термоокислительным реакциям, активизируемым динамической нагрузкой.

При температурах до 227°С вся адсорбированная вода, образовавшаяся в результате реакции поликонденсации, испаряется и выделяется избыточный фенол, крезол и другие вещества. В процессе окисления выделяется водород ($Me + H_2O \rightarrow MeO + 2H$). При температурах 327...427°С смолы распадаются на фенол, бензол, ксилол и крезол и водород может выделяться как результат вторичных окислительных реакций этих продуктов. В области температур 527...727°С образуется смесь газов $H_2 + CO + CO_2$ и CH_2, а смолы обугливаются. Таким образом, трение композитных фрикционных материалов сопровождается выделением водорода.

Количество адсорбированного водорода на поверхности зависит от наличия легирующих элементов. Износ, вызванный водородом, будет определяться условиями адсорбции водорода, а также изменением числа вакансий на поверхности, т. е. количеством водорода, продиффундировавшего в сталь. Максимальная адсорбция водорода на железе соответствует 77°С, т. е. когда начинается десорбция продуктов распада органи-

ческих соединений с низкой молекулярной массой. Эта десорбция прекращается при температуре около 127°С, а адсорбция водорода продолжается до 427°С. В таких условиях содержание водорода в стали увеличивается.

Сталь на поверхности обезуглероживается: $F_3C + 4H \rightarrow 3Fe + CH_4$. В результате наводороживания цементит дает губчатый феррит с очень плохими механическими свойствами. Реакция обезуглероживания подтверждена рентгеноструктурным фазовым анализом [57]. Одним из методов борьбы с водородным износом является введение в тормозной материал 2...30% окиси меди, которая восстанавливается водородом до чистой меди. Этот металл — наполнитель не только изменяет некоторые свойства фрикционного материала (например, теплопроводность), но и заметно влияет на процесс трения: ликвидируется перенос стали на фрикционный материал. Введение в тормозной материал алюминия как наполнителя не дало положительных результатов. Окислы алюминия имеют высокую твердость и вызывают абразивное изнашивание обоих элементов пары трения. В целом наполнитель не должен быть тверже, чем сопряженная поверхность, и его температура плавления должна быть ниже, чем у сопряженного материала [57].

Повреждение пластмассовых тормозных колодок железнодорожных вагонов. Тяжелые условия работы тормозных пластмассовых колодок железнодорожного транспорта вызывают большие повреждения поверхностей трения в результате переноса материала бандажа колеса. На рис.6.13 показана изношенная пластмассовая тормозная колодка. Пластмасса у конца колодки изношена до металлического каркаса. На ее рабочей поверхности заметен значительный перенос стали.

В практике эксплуатации железнодорожных вагонов с пластмассовыми тормозными колодками были случаи весьма большого намазывания металла на пластмассу. Масса перенесенного металла достигала 100 г на колодку. Процессы переноса стали в связи с ее наводороживани-

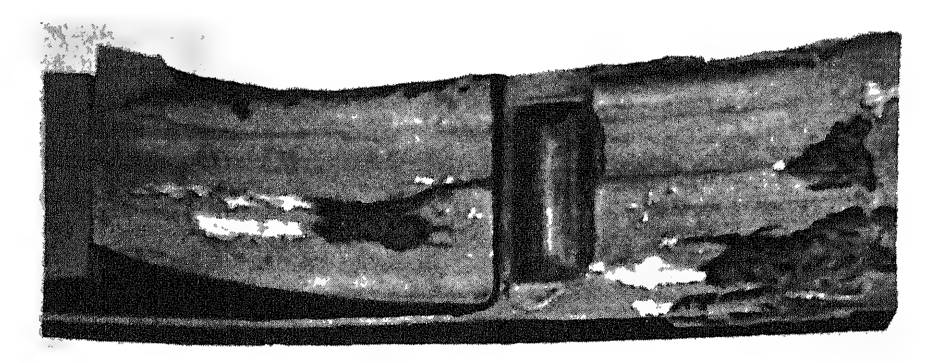


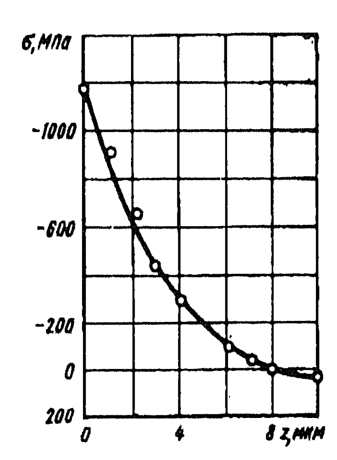
Рис. 6.13. **Участок переноса стали на тормозную колодку колеса железнодорожного вагона**

ем в тормозах вагонов изучали Ю.А. Евдокимов и В.И. Колесников. Цель их работы состояла в том, чтобы путем подбора пластмассы или присадок к ней создать электрическое поле в зоне контакта, которое бы не позволяло проникновению водорода в бандаж колеса. Проводимые исследования дали положительные результаты.

Разрушение стальной поверхности коленчатых валов компрессоров. Наводороживание и разрушение стальной поверхности трения может возникнуть в таких сочленениях, как баббитовый подшипник—шейка коленчатого вала. Например, перенос стали вала компрессора на поверхность подшипника возникал в процессе приработки подшипника после изготовления компрессора; смазочный материал содержал коррозионно-активные присадки, предназначенные для ускорения приработки. После разрушения поверхностного слоя вала частицы стали распределялись по поверхности баббита, подобно тому как это наблюдалось на подпятниках керосиновых насосов.

7.3. Некоторые методические вопросы при изучении водородного изнашивания

При изучении наводороживания металлов в процессе трения следует учитывать, что распределение водорода в поверхностном слое отличается от такового при электролитическом наводороживании. В последнем наибольшую концентрацию водорода имеют слои металла, прилегающие к поверхности; концентрация водорода по глубине постепенно уменьшается. В зависимости от концентрации водорода в поверхностном слое образуются внутренние напряжения сжатия, распределение которых отражает содержание водорода.



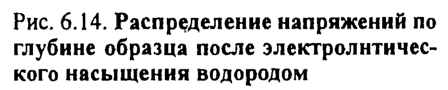
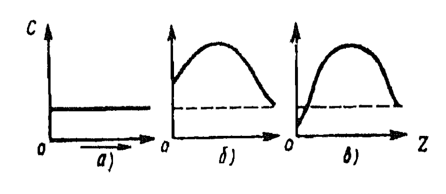


Рис. 6.14. **Распределение напряжений по глубине образца после электролитического насыщения водородом**



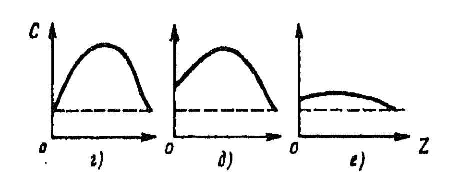


Рис. 6.15. **Динамика перераспределения концентрации водорода в стальном образце (схема):**
а — исходное состояние; *б* — состояние в процессе трения; *в* — состояние по окончании трения; *г* — начало десорбции; *д* — максимум десорбции; *е* — конец десорбции

На рис.6.14 приведена кривая распределения напряжений по сечению образца аустенитной стали, содержащей 22% Cr и 21% Ni, после 7 ч электрического насыщения при температуре 24°C. В поверхностном слое напряжения сжатия достигают громадной величины (по данным М. Смилковского, предел прочности стали в исходном состоянии приблизительно 260 МПа).

Динамика распределения концентрации водорода в поверхностном слое при трении. При трении накопление водорода в поверхностном слое происходит более интенсивно, его концентрация в поверхностном слое более высокая, чем при электролитическом наводороживании.

Распределение водорода не носит стабильного характера, поскольку температура в поверхностных слоях и напряжения, вызываемые трением, меняются в зависимости от условий трения. В связи с этим процессы трения сопровождаются сложной динамикой распределения концентрации водорода как в поверхностном слое, подвергаемом трению, так и в слоях, расположенных на глубине до 3...4 мм.

В.Я. Матюшенко, Г.П. Шпеньков и автор предложили следующую схему распределения концентрации водорода в стальном образце (рис. 6.15). В процессе трения концентрация водорода в поверхностном слое выше, чем в исходном состоянии. Это естественно, потому что процесс наводороживания в данном случае отражает именно прирост концентрации водорода по сравнению с исходной.

Перераспределение концентрации водорода в локальной зоне поверхностного слоя на различных этапах трения и отдыха представлено на рис.6.16. Интерес представляют 3...5 этапы трения. Чтобы объяснить такое поведение водорода, нужно представлять, что является движущей силой диффузионных процессов, связанных с перераспределением концентрации водорода как в поверхностном слое, так и в объеме металлического тела. Этими силами являются градиенты температуры, напряжений и концентрации водорода [29].

Об определении концентрации водорода в образцах после испытания на треиие. Водород при нормальной температуре обладает высокой подвижностью в сталях за исключением аустенитных хромоникелевых. Только при температуре –70°C его подвижность настолько понижается, что ею можно пренебречь. Поэтому при изготовлении деталей и после их испытания на трение и износ в целях определения содержания в них водорода, а также при хранении образцов надо учитывать потери водорода. Необходимо до минимума уменьшить время механической обработки и возможный разогрев стали при изготовлении образцов. Поверхность трения детали или образца необходимо подвергать резкому охлаждению.

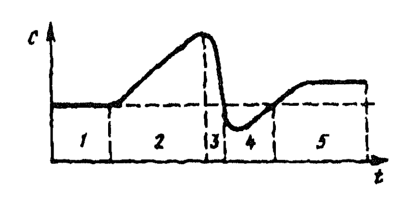


Рис. 6.16. **Измененне концентрации водорода в локальной зоне поверхностного слоя стали на различных этапах:**
1 — исходное состояние; 2 — состояние в процессе трения; *3* — состояние по окончании трения; *4* — возврат концентрации; *5* — начало десорбции

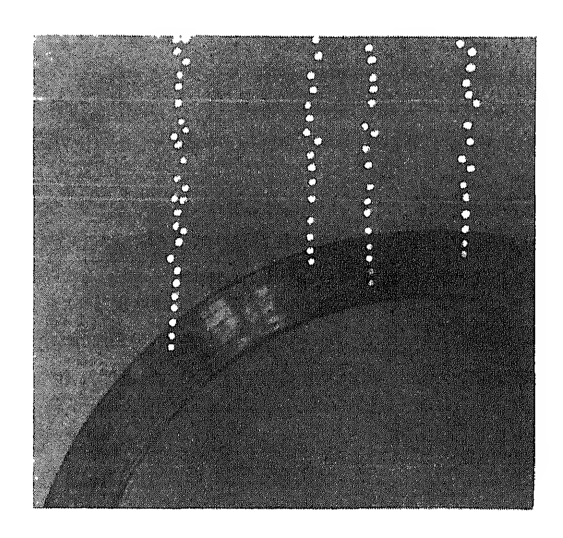


Рис. 6.17. **Треки пузырьков водорода, выделившегося из погруженной в глицерин стали после трения**

Потери водорода учитывают и при объемном наводороживании в случае изготовления образцов. Так, при вырезании образцов 15×15×15 мм из слитков хромистой стали дисковой пилой без охлаждения в шесть приемов при максимальной температуре в зоне трения 100 °С потери водорода, по данным Н. Циттера, составляли 25%.

Особенно большие потери водорода происходят с поверхности трения при высокотемпературных испытаниях на трение и изнашивание. В процессе трения пары ретинакс — Ст3 при нагрузке 8 МПа в течение 5 мин при частоте вращения 750 мин$^{-1}$ на торцовой машине трения сразу же после остановки наблюдалось интенсивное выделение пузырьков газа с поверхности стали. В некоторых случаях газ выходил из образца под большим давлением, что было заметно по характерным трекам серии мелких пузырьков, следующих один за другим (рис. 6.17).

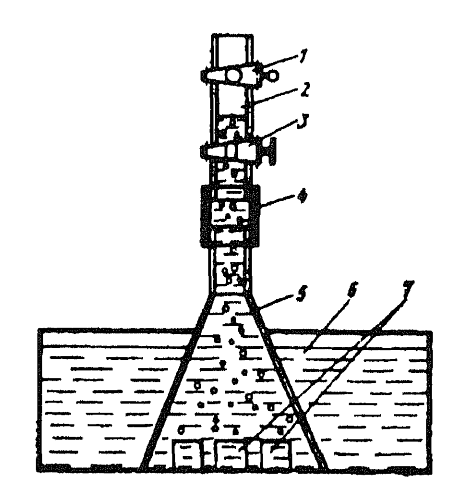


Рис. 6.18. **Схема отбора выделившегося газа:**
1, 3 – краны; *2* – собранный газ; *4* – резиновая трубка; *5* – стеклянная воронка; *6* – ванна со спиртоглицериновой смесью; *7* – стальные образцы

В.Я. Матюшенко собрал газ, выделяющийся из серии образцов, в микробюретку (рис. 6.18) и

проанализировал на газовом хроматографе типа ЛХМ7А. Было установлено, что выделяющийся газ содержит более 75% водорода.

В ряде испытаний при изучении водородного изнашивания целесообразно использовать тонкие образцы (в виде фольги). В этом случае удается более точно определить содержание водорода.

8. Влияние влажности воздуха на интенсивность водородного изнашивания

Влажность воздуха оказывает сильное воздействие на интенсивность изнашивания металлов. Это имеет большое значение для машин массового применения, эксплуатирующихся на открытом воздухе, особенно для нашей страны с обширными районами повышенной влажности. Приведем некоторые результаты исследований о влиянии влажности воздуха на изнашивание металлов; к сожалению, работ в этом направлении выполнено мало.

Н. Уетц [46] изучал влияние влажности воздуха на изнашивание металлов при скольжении на машине Зибеля и Кейля, где торцовые поверхности двух трубчатых образцов скользили одна по другой (без смазочного материала) со скоростями 0,05 и 0,02 м/с при различных давлениях. Эксперименты проводили на воздухе с переменной влажностью и в вакууме при разных давлениях водяного пара. Перед испытаниями образцы шлифовали, обезжиривали и высушивали.

Усредненные данные о влиянии влажности на интенсивность изнашивания при пробеге 100 м представлены на рис. 6.19. С ростом относительной влажности (до 50%) износ линейно возрастает, а затем замедляется. В области относительной влажности 50% поверхность трения полностью покрывается мономолекулярным слоем воды. Характерно, что продукты износа при влажности 5% имеют темный серо-коричневый цвет (вероятно, Fe_2O_3). При влажности 50 и 90% продукты износа имеют вид серого металлического порошка.

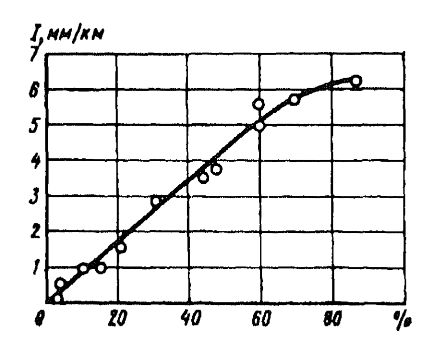


Рис. 6.19. **Зависимость интенсивности изнашивания пары малоуглеродистая сталь — малоуглеродистая сталь от относительной влажности при длине пробега 100 м, давлении 1 МПа и скорости скольжения 0,05 м/с**

Влияние влажности особенно резко проявляется при трении малоуглеродистой стали. При увеличении влажности с 5 до 90% износ возрос в 150 раз. В этих же условиях в парах трения сталь 45 по стали 45 износ увеличился в 22, бронза по бронзе в 3,5, латунь по латуни в 1,6 раза.

Интенсивность изнашивания пары сталь 45 — сталь 45 при давлении 1 МПа была низкой (0,12 мм/км). При повышении влажности до 5% износ возрос в 18 раз, а при повышении влажности до 100% — в 23 раза.

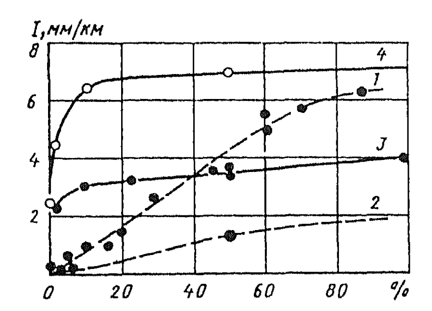


Рис .6.20. **Зависимость интенсивности изнашивания сталей от влажности в вакууме (кривые *1*, *2*) и на воздухе (кривые *3*, *4*) при различном давлении *p* и скорости скольжения *v*:**

1 — малоуглеродистая сталь — малоуглеродистая сталь, p = 1 МПа, v = 0,05 м/с; *2* — сталь С45 - сталь С45, p = 1 МПа, v = 0,05 м/с; *3* — сталь СК45 — сталь СТ45, p = 0,765 МПа, v = 0,05 м/с; *4* — сталь СК45 — сталь СК45, p = 1 МПа, v = 0,2 м/с

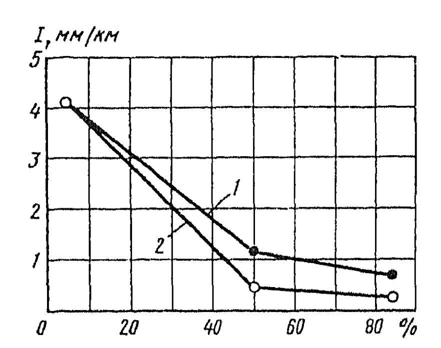


Рис. 6.21. **Зависимость интенсивности изнашивания сталей от относительной влажности воздуха при давлении 50 кПа и скорости скольжения 0,05 м/с:**

1 — малоуглеродистая сталь — малоуглеродистая сталь; *2* — сталь С60 — сталь С60

На рис. 6.20 представлена зависимость интенсивности изнашивания образцов от влажности в вакууме и в атмосфере, полученная Н. Уетцом. При низкой влажности интенсивность изнашивания в вакууме меньше, чем на воздухе, поскольку в последнем случае на поверхностях трения образуются окислы. При большой влажности (свыше 40%) интенсивность изнашивания в вакууме достигает предельного значения и далее уже не изменяется с увеличением влажности.

Эксперименты показали, что влажность оказывает меньшее влияние на интенсивность изнашивания цветных металлов.

При меньших нагрузках установлена обратная зависимость влияния влажности на интенсивность изнашивания (рис. 6.21). Уменьшение интенсивности изнашивания с увеличением влажности объясняется образованием оксидного слоя на поверхностях скольжения и полированием поверхностей.

Влияние скорости скольжения поверхностей на износ показано на рис. 6.22. После достижения определенной скорости скольжения происходит по-

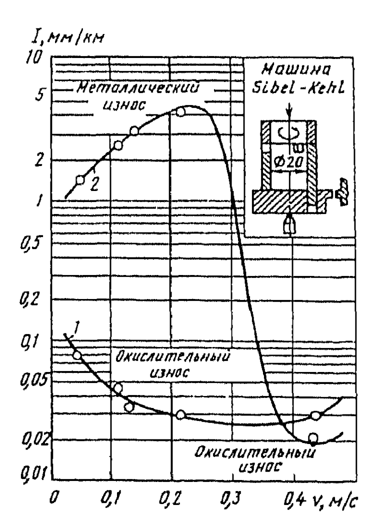


Рис. 6.22. **Зависимость интенсивности изнашивания пары трения сталь С45 — сталь С45 при давлении 1 МПа от скорости скольжения при относительной влажности воздуха 5% (кривая *1*) и 50% (кривая *2*)**

вышение температуры поверхностей. В результате фактическая влажность уменьшается и происходит резкое снижение скорости изнашивания. Здесь наблюдается переход от металлического изнашивания (термин Н. Уетца) к окислительному.

Все приведенные данные о влиянии влажности на износ металлов были получены Уетцом в 1968 г., когда о водородном изнашивании еще не было известно. В настоящее время полученные зависимости можно объяснить образованием в зоне контакта водорода в результате разложения воды. Бронза и латунь в меньшей степени охрупчиваются и насыщаются водородом. Окисление также существенно влияет на износ поверхностей. Несомненно, что при большой влажности возможны коррозионные процессы на поверхностях трения.

9. Водородное изнашивание при трении качения

До настоящего времени почти не было исследований влияния старения масла на интенсивность изнашивания подшипников качения. Лишь в небольшом числе работ, в частности у Л. Грунберга, утверждалось, что химический состав и вид смазочного материала могут непосредственно влиять на сопротивление усталости подшипников качения и зубчатых передач. Установлено, что химические процессы в масле в результате действия присадки могут в 10 раз и более увеличить сопротивление контактной усталости. Снижение же сопротивления контактной усталости проявляется особенно в большой степени в виде точечной коррозии стальных шариков под действием воды, находящейся в масле, и водородной хрупкости.

Таблица 6.3

Коррозия на верхнем шарике	Время до появления выкрашивания на шариках, мин, при нагрузке	
	4 кН	6 кН
Отсутствует	$\frac{275...845}{500}$	$\frac{70...422}{196}$
Начальная	$\frac{360...584}{430}$	$\frac{40...88}{67}$
Значительная	—	$\frac{3...8}{4,6}$

Примечание. В числителе указаны максимальное и минимальное значения величины, в знаменателе — средние.

Первые сведения о наводороживании при трении качения появились в 1963 г., когда Л. Грунберг и др. провели исследования влияния присутствия воды в минеральном масле на ускорение разрушения шарикоподшипников, изготовленных из обычных сталей.

Был предложен механизм ускоренного разрушения шарикоподшипников, основанный на образовании вакансионной диффузии водорода в высоконапряженную сталь и ее охрупчивании. Эту гипотезу проверяли на четырехшариковой машине со смазочным материалом, содержащим 6% тритиевой воды высокой активности.

На испытуемом приводном шарике образовались питтинги, на остальных трех шариках напряжения были меньше и признаков поверхностных усталостных разрушений не наблюдалось. После испытания в тритиевой воде шарики промывали в ацетоне, погружали в жидкий сцинтиллятор и подсчитывали радиационную активность. После испытаний было зарегистрировано от 1000 до 2000 импульсов в 1 с. Не подверженная усталости часть шариков давала 40 импульсов в 1 с при фоне около 30 импульсов в 1 с. Активность на поврежденном участке со временем уменьшалась и через 5 суток приближалась к уровню фона. Описанный эксперимент подтверждает гипотезу, что в присутствии воды водород внедряется в металл, подвергаемый поверхностному усталостному воздействию. Уменьшение радиационной активности со временем может быть отнесено к выводу трития из металла.

Косвенным подтверждением влияния наводороживания на контактную усталость являются эксперименты по выяснению влияния поверхностной коррозии на контактную прочность стали ШХ15, выполненные В.Г. Кузнецовым [25]. Исследовали три партии шариков: без признаков коррозии; с начальной коррозией, возникающей на поверхности шариков при погружении их на 72 ч в 3%-ный раствор поваренной соли; со значительной коррозией, появившейся в результате пребывания шариков в коррозионной камере 15 суток при 100%-ной влажности и присутствии в атмосфере камеры примеси сернистого газа (0,01 мг/л).

В качестве смазочного материала использовали пластичную смазку 1–13, имевшую в начале температуру 18...20°С, затем она нагревалась до 50...70°С. В результате опытов выявлено (табл. 6.3), что наличие даже небольшой коррозии на металлических поверхностях, работающих в условиях трения качения при высоких нагрузках, резко ускоряет появление усталостных разрушений. При значительной коррозии разрушение ускоряется в десятки раз.

В этом случае, очевидно, имеют значение два фактора: фактор наводороживания, в результате которого повышаются напряжения в поверхностном слое, и фактор повышения шероховатости поверхности, что влечет увеличение контактных напряжений. Степень участия этих факторов — задача дальнейших исследований.

Для узлов трения современной техники (особенно для тяжелонагруженных подшипников авиационных двигателей) представляют интерес исследования по изучению причин снижения сопротивления усталости при качении, обусловленного присутствием воды в смазочном материале или топливе при эксплуатации машин и механизмов.

Механизм понижения работоспособности тел качения при наличии воды в смазочном материале сложен; он включает взаимосвязь циклически изменяющихся напряжений и химических реакций на поверхнос-

ти, ведущих к коррозии и водородному изнашиванию. При повышении качества сталей и уменьшении вследствие этого числа подповерхностных неметаллических включений, вызывающих усталостное разрушение при качении соприкасающихся деталей, более важное значение приобретают химические реакции с водой, приводящие к наводороживанию и, как следствие, к образованию поверхностных дефектов — концентраторов напряжений.

Количественная оценка влияния воды на контактную усталость выполнена Р. Шацбергом на четырехшариковой машине [52]. Верхний образец вращался с частотой 1730 мин$^{-1}$, а нижние три шарика были разделены сепараторами и свободно двигались в кольце. Смазочным материалом служил очищенный парафин с кинематической вязкостью $13 \cdot 10^{-6}$ м^2/с при температуре 50°С. Шарики диаметром 12,7 мм изготовляли из дегазированной в вакууме стали К.52100 Американского института черной металлургии, твердость *HRC* 63. Кольца были из той же стали и имели твердость *HRC* 59. Смазывание — циркуляционное, расход парафина 70 мл/мин. Воду в смазочном материале строго дозировали. Испытания проводили до появления на поверхности металла небольшой язвы или скола.

Результаты испытаний (кривые Вейбулла), приведенные на рис. 6.23, показывают влияние содержания воды в смазочном материале на долговечность. Постоянные углы наклона кривых на рисунке свидетельствуют о постоянстве режима смазки во всем диапазоне напряжений. Смазочный материал в данном эксперименте можно рассматривать как нейтральный, служащий только носителем воды.

Установлено также, что растворенная в смазочном материале вода значительно повышает интенсивность изнашивания катящихся тел. Опыты, проведенные при сравнительно низком максимальном контактном напряжении по Герцу (3240 МПа), при котором пластическая деформация не обнаруживалась, показали, что присутствие в смазочном материала 120 мг/л воды привело к шестикратному увеличению количества материала, собранного на фильтре, по сравнению с количеством материала, собранным при отсутствии воды в масле. Влияние воды на интенсивность изнашивания видно из данных табл. 6.4.

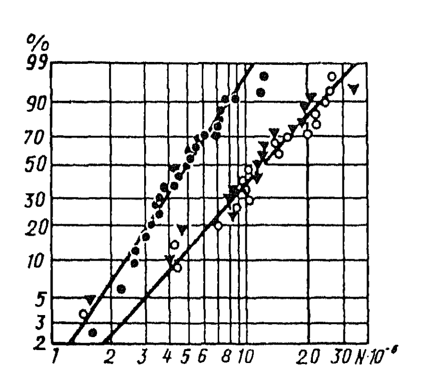


Рис. 6.23. **Ускоряющее влияние воды на контактную прочность при качении:**
О – обезвоженное масло, образующее эмульсию; ● – масло + 1% морской воды; ▼ – масло + 1% морской воды + 0,1% ИПАЭ

Частицы износа были подвергнуты рентгеновскому анализу. В них обнаружены окись железа Fe_2O_3 и моногидрат этой окиси

$Fe_2O_3 + H_2O$. Последний обнаруживался только в том случае, если в смазочном материале находилась вода. К сожалению, при исследовании не был проведен анализ содержания в продуктах износа свободного водорода.

Таблица 6.4

Напряжения по Герцу, МПа	Время обкатки, ч	Концентрация воды в смазочном материале $K \cdot 10^{-4}$, %	Износ, мг
6500	32,4	10	0,124
	21,3	100	0,194
	72,3	10	0,114
	42,3	100	0,232
3240	354	10	1,8
	2992	120	10,8

Механизм влияния воды на снижение контактной усталости, по мнению авторов, состоит в следующем. Поверхностные микротрещины, образованные в условиях контакта при качении, действуют как тонкие капилляры. Смазочный материал заполняет эти капилляры, а растворенная в нем вода, конденсируясь в вершинах трещин, образует богатую водой фазу. Циклические напряжения, сконцентрированные у вершины трещины, водная коррозия и водородное охрупчивание действуют совместно, увеличивая скорость роста трещины. Вода может привести к образованию небольших коррозионных повреждений, которые становятся концентраторами напряжений.

Р. Шацберг [52] указывает методы предотвращения снижения контактной усталости при качении, обусловленной присутствием воды в смазочном материале. Экспериментально установлено, что с помощью присадок можно снизить вредное действие воды и повысить долговечность подшипников. Результаты опытов, проведенных на четырехшариковой машине, показывают, что добавка 0,1% изопропиланинэтанола (ИПАЭ) полностью нейтрализует вредное влияние 1% воды, образующей со смазочным материалом эмульсию. В трещине существуют анодная и катодная зоны, причем металл в конце трещины служит анодом.

Развивающаяся коррозия приводит в отсутствие кислорода к образованию ионов двухвалентного железа, гидроокиси железа и ионов водорода. Восстановление последних в катодной зоне трещины ведет к образованию атомарного водорода, который может растворяться в стали. Предполагают, что образующиеся ионы водорода захватывают ИПАЭ, поэтому они не могут восстанавливаться в катодной зоне до атомов водорода, которые могли бы растворяться в стали и вызывать водородное охрупчивание.

На рис. 6.24 представлены вероятностные кривые Вейбулла, которые свидетельствуют о влиянии 1% воды на усталостную долговечность и уменьшении этого влияния при введении в смазочный материал 0,1% ИПАЭ.

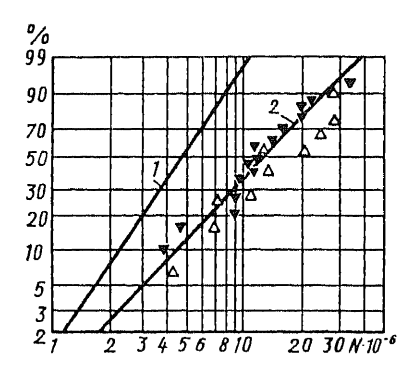


Рис. 6.24. **Влияние концентрации присадки МПАЭ на эффективность ингибирования:**
1 – влажный смазочный материал; *2* – обезвоженный смазочный материал; ▼ – масло + 1% морской воды + + 0,1% ИПАЭ; ∇ – масло + 1% морской воды + 0,25% ИПАЭ

Поскольку большинство смазочных материалов содержит некоторое количество воды, то добавление ИПАЭ может увеличить усталостную долговечность. Однако как утверждает Р. Шацберг, использование ИПАЭ целесообразно в случаях, как уже доказано, когда присутствие воды в смазочном материале вызывает существенное снижение долговечности.

Г. Хайнике[48] также отмечает, что наличие воды (в смазочном материале или воздухе) нужно учитывать в процессах трения и изнашивания металлов даже в условиях глубокого вакуума, например, при масспектроскопическом исследовании всегда можно обнаружить воду в остаточном газе. Если совершенно удалить воду, то можно наблюдать поразительные эффекты. Известно, что графит при полном удалении воды в значительной степени утрачивает хорошие смазывающие свойства. Характерно, что вода оказывает влияние на свойства графита при низких концентрациях.

Уменьшить наводороживание тел качения в результате действия воды при эксплуатации можно применением в подшипниках качения режима ИП. В этом случае образование на контактной поверхности тонкой медной пленки предотвращает проникновение воды и водорода в микротрещины и может в значительной степени повысить контактную прочность.

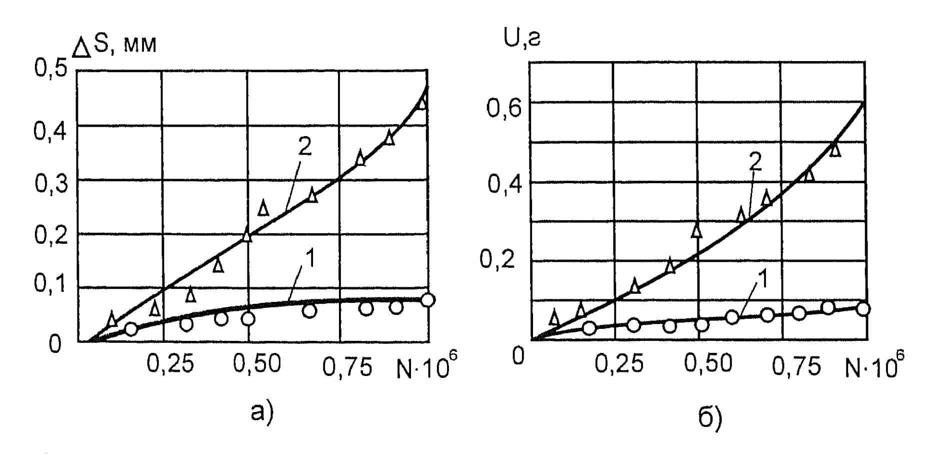


Рис. 6.25. **Влияние добавок водорода (кривые *1*) и кислорода (кривые *2*) в воду на увеличение радиального зазора (*а*) и износ (*б*) шарикоподшипников в зависимости от числа оборотов**

При рассмотрении влияния воды на износ подшипников нельзя обойти тот факт, что введение в воду водорода не оказало заметного влияния на интенсивность изнашивания подшипников качения. Введение же в воду кислорода привело к значительному увеличению радиального зазора в подшипниках (рис. 6.25). Опыты проводили при температуре 93°C. При повышении температуры до 260°C износ увеличивался в 10 раз. Концентрации (мл/кг) добавок в воду (pH = 6,5...7,5), используемой при испытаниях, приведены ниже [22].

O_2	1...3
H_2	90...110
Деаэрированная вода	Нет

Наличие растворенного водорода в некоторой степени может служить защитой против щелевой коррозии [48].

10. Водородное изнашивание при трении и резании древесины

Данные о выделении водорода при трении древесины в результате трибохимических процессов приведены в работе [4]. Термическое разрушение древесины активно протекает уже при температуре 200°C. Водород имеется во всех веществах, которые составляют древесину (эфиры, целлюлоза и др.). Исследования проводили на установке, обеспечивающей возможность испытания образцов в газовой или жидкой средах и позволяющей делать качественный и количественный анализ газообраз-

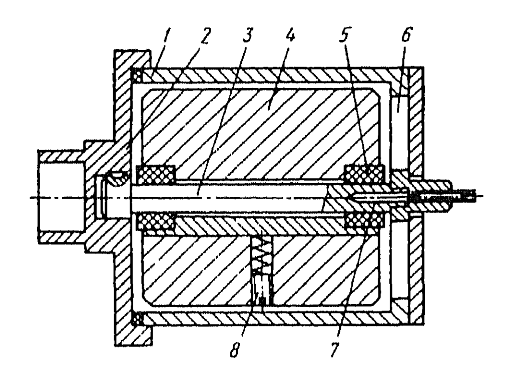


Рис. 6.26. **Схема испытательной камеры стенда для исследования продуктов газовыделения, образующихся при трении полимеров:**
1 – герметичный стальной цилиндр; *2* – съемная крышка; *3* – вал, закрепленный жестко на оси цилиндра; *4* – цилиндрическая втулка-нагружатель: *5* – вкладыши; *6* – смотровое окно для визуальной фиксации силы трения по отклонению нагружателя; *7* – термопара; *8* – пружинный усилитель

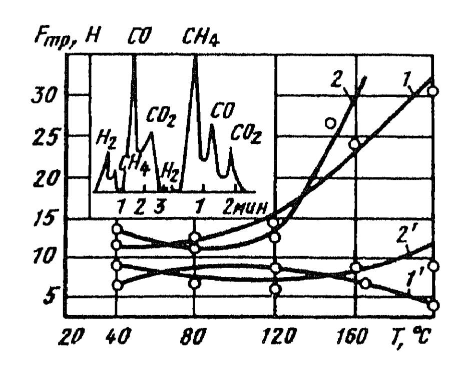


Рис. 6. 27. **Хроматограммы и зависимости силы трения от температуры пары металл – древесина при** v **= 0,76 м/с (кривые** *1*, *1'***) и при** v**= 0, 25 м/с кривые** *2*, *2'***):**
1, *2* – режим – водородное изнашивание;
1', *2'* – незначительное водородное изнашивание

ных продуктов трения при различных давлениях, скоростях скольжения и температурах. Установка состояла из камеры (рис. 6.26), в которой происходило трение исследуемых материалов, вакуумной системы и газового анализатора.

Исследовали образцы из уплотненной на 35% древесины берез при давлении 0,2 МПа и скоростях скольжения 0,25 и 0,75 м/с. Контртелом служили образцы из стали У8 (*HRC* 35...40). Перед испытаниями камера вакуумировалась и заполнялась аргоном, свободным от примесей водорода. Время испытаний для каждой серии опытов составляло 4...6 ч. Верхний предел температуры, при котором испытания прекращали, ограничен 180°С.

После остановки стенда анализ смеси неконденсирующихся газов показал довольно большое количество водорода. По данным хроматограмм неконденсировавшиеся газы, которые образовались при трении уплотненной и неуплотненной древесины (Т = 150°С), имели следующий состав, %: H_2–4,2 ... 6; CH_4–2; CO–72; CO_2 – 20. Хроматограммы и изменение силы трения в зависимости от температуры по данным работы [4] приведены на рис. 6.27.

Для подавления водородного изнашивания древесину наполняли оксидом меди. В процессе разложения древесины выделившийся водород восстанавливает окись меди до чистой меди, которая покрывает стальную поверхность тонким слоем. Водород в меньшей степени диффундирует в сталь, что благоприятно сказывается на работе пары трения. Концентрация водорода в объеме газовой смеси снижается до 1%.

При резании древесины инструменты в значительной степени подвергаются наводороживанию, что снижает их стойкость и вызывает охрупчивание зубьев. Результаты исследования наводороживания зубьев дереворежущих инструментов, выполненного Е.А. Памфиловым [32], приведены на рис. 6.28 и 6.29.

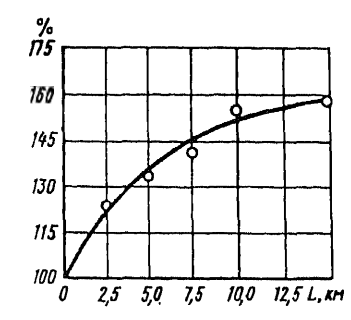


Рис. 6.28. Зависимость насыщения стали водородом (в % к исходному) от пути резания древесины

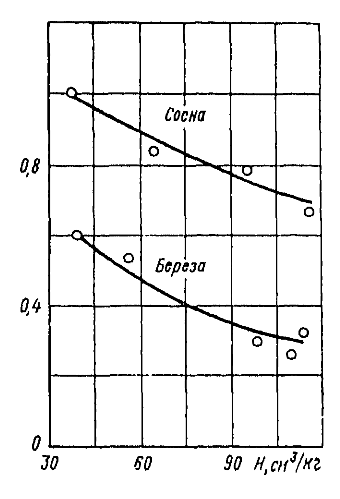


Рис. 6.29. Зависимость износостойкости образцов из стали от содержания в ней водорода при трении по древесине

Вопрос наводороживания дереворежущих инструментов только поставлен и методы повышения износостойкости режущего инструмента еще не разработаны.

11. Водородное изнашивание титановых сплавов

Титан и его сплавы обладают рядом свойств, которые выгодно отличают их от других конструкционных материалов. Такими свойствами являются высокие коррозионная стойкость, коррозионно-механическая прочность, эрозионно-кавитационная стойкость, низкая хладноломкость, немагнитность, особые физико-механические характеристики (отсутствие продуктов коррозии в системах, относительно малые тепловые деформации).

Антифрикционные свойства титановых сплавов низкие, что в большей мере лимитирует их применение в механизмах с узлами трения. По сравнению с другими конструкционными металлами (за исключением алюминия и его сплавов) при трении титана развиваются большие пластические деформации, что увеличивает температуру поверхностей трения и роль диффузионных процессов. Указанные обстоятельства повышают интенсивность водородного изнашивания титана, которое, как правило, сопровождается схватыванием поверхностей. Проникающий в поверхностные слои водород образует с титаном химическое соединение, которое, обладая высокой хрупкостью, резко снижает антифрикционные свойства поверхностей.

Антифрикционные свойства титанового сплава, содержащего 5% Al, в зависимости от давления и скорости скольжения при трении на воздухе, в морской воде и трансформаторном масле изучали В.И. Гольдфайн, М.А. Зуев и А.Г. Каблуков [16]. Образцы не имели поверхностного упрочнения, шероховатость поверхности Ra = 1,25...0,32 мкм. Испытания проводили на машине трения МИ-1М по схеме вал—частичный вкладыш. Среднее значение суммарной интенсивности изнашивания образцов и контртел линейно зависит от давления (рис. 6.30, *а*).

Наибольшая интенсивность изнашивания наблюдалась при смазывании трансформаторным маслом; она была меньше в среде морской воды и еще меньше без смазочного материала на воздухе. Изменение интенсивности изнашивания в зависимости от среды соответствовало изменению микротвердости поверхностных слоев. Микротвердость поверхности трения (рис.6.30, *б*), измеренная на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,49 Н, имела наибольшее значение при трении на воздухе и наименьшее при трении в минеральном масле. Изменение коэффициента трения в зависимости от давления показано на рис. 6.30, *в*.

Глубина повреждения образцов при трении в морской воде и в масле меньше, чем при трении на воздухе без смазочного материала при давлении до 1 МПа, и одинакова при давлениях 2 и 3 МПа. В процессе трения в масле разрушение узлов схватывания наблюдалось лишь в тонком слое материала без глубинного вырывания, но с интенсивным диспергированием поверхностного слоя и образованием продольных рисок.

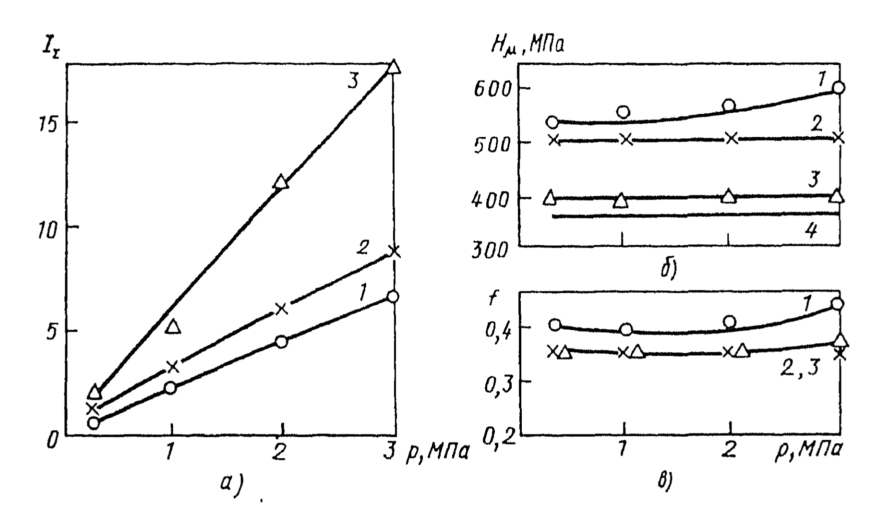


Рис. 6.30. **Зависимости суммарной интенсивности изнашивания образцов и контртел (*а*), среднего значения микротвердости поверхности трения (*б*) и коэффициента трения (*в*) от давления:**

1 — трение на воздухе без смазочного материала; *2* — трение в морской воде; *3* — трение со смазочным материалом; *4* — исходная микротвердость после шлифования

Коэффициент диффузии водорода в α-фазе титанового сплава выше, чем в β-фазе. Поэтому сплавы, содержащие α-фазу, легче подвергаются наводороживанию. В титановых сплавах с α-фазой быстрее образуется гидридная фаза, так как α-фаза мало растворяет водород.

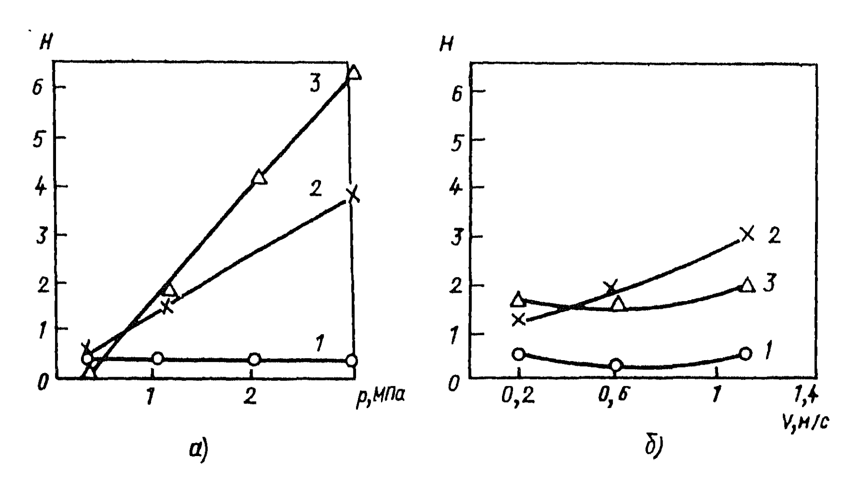


Рис. 6.31. **Количество водорода Н в продуктах износа титановых сплавов на 1 см^2 поверхности трения при 1 км пути трения в зависимости от давления (*а*) и скорости скольжения (*б*):**

1 — трение на воздухе без смазочного материала; 2 — трение в воде; *3* — трение со смазочным материалом

При трении титановых сплавов наличие водорода, поступающего из окружающей среды, приводит к резкому снижению их износостойкости в результате повышения хрупкости поверхностных слоев (наличия гидрофильной фазы).

В продуктах износа титановых сплавов количество водорода превышает допустимое его содержание в исходных сплавах. Титан становится хрупким при содержании водорода более 0,025%. Количество водорода, находящегося в продуктах износа, в зависимости от давления и скорости приведено на рис. 6.31.

Даже обычные смазочные материалы, содержащие поверхностно-активные вещества, не создают на поверхности титана и его сплавов прочной адсорбированной пленки. Смазочный материал является поставщиком водорода, вызывающего охрупчивание поверхностного слоя металла. Поэтому обычные смазочные материалы не снижают, а увеличивают износ титановых сплавов.

Влияние фазового состава титановых сплавов на их антифрикционные свойства при трении со смазочным материалом изучал М.Г. Фрейдлин [47]. Процесс наводороживания титановых сплавов происходит не только при трении, но и при фрезеровании, если обработку производят во влажной среде. С увеличением относительной влажности растет содержание водорода; при повышении влажности с 55 до 94% содержание водорода увеличивается в 10 раз.

Когда титановые образцы обрабатывают с охлаждением 5%-ным раствором эмульсии ЭТ-2, количество водорода в образцах увеличивается также в 10 раз. Выделение водорода из воды при взаимодействии с титаном описывается схемой $Ti + 4H_2O \rightarrow Ti(OH)_4 + 2H_2$. Для уменьшения наводороживания при резании титановых сплавов на повышенных скоростях (30 ... 35 м/мин) необходимо, чтобы относительная влажность воздуха не превышала 60 %, при этом, как отмечают И.Ф. Дубровин и В.Я. Суворин, нельзя применять охлаждающую жидкость.

Для улучшения антифрикционных свойств титановых сплавов их предварительно подвергают термическому оксидированию на воздухе или в различных средах (песке, графите, расплавах солей и т.п.) при температуре 500...1100°С. Именно в этом температурном интервале независимо от состава окислительной среды образуется оксидная пленка и газонасыщенный слой, обусловливающие прочную адгезию последующего фрикционного покрытия. При температуре ниже 500°С они получаются очень толстыми и при фрикционной обработке разрушаются.

После оксидирования поверхность изделий натирают медью или медными сплавами в среде глицерина. На поверхности в результате схватывания и переноса формируется равномерное покрытие из меди и ее сплавов, которое предотвращает схватывание и заедание поверхностей и улучшает антифрикционные свойства изделий.

Результаты испытаний показывают, что применение предложенного способа при обработке роликов из сплава ВТ3-1 существенно уменьшает интенсивность изнашивания роликов и еще более бронзовых вклады-

шей при одновременном уменьшении коэффициента трения более чем в 7 раз по сравнению с его значением при испытании необработанных роликов.

12. Водородное изнашивание узлов трения машин и оборудования микробиологического и медицинского производств

Трущиеся детали технологического оборудования медицинского и микробиологических производств интенсивно изнашиваются в результате высокой их активности с техногенными средами. Техногенная среда белковых веществ, попадая в зону трения, активно взаимодействует с поверхностью металла на пятне контакта, т.е. в локально нагруженных участках детали. Возникают коррозионные процессы, скорость которых зависит от активности микроорганизмов, продуктов их метаболизма, наличия питательной среды и условий существования бактерий [38]. Особенностью этих процессов является совместное протекание электрохимической и бактериальной коррозии, причем каждая из них взаимно инициирует и развивает друг друга. Биокоррозионные процессы разрыхляют рабочий слой детали, образуя на поверхности контакта микродефекты, способствующие разрушению поверхности. Активную роль здесь играет и эффект Ребиндера.

Результаты исследований А.Ф.Присевка и его сотрудников [37, 38] показали, что усугубляющим фактором процесса разрушения деталей является биогенный водород. Его появление в среде связано со способностью микроорганизмов использовать для обмена веществ широкий круг. органических и минеральных соединений, которыми насыщена техногенная среда. Такая способность обусловлена наличием у микроорганизмов и бактерий большого разнообразия ферментов, участвующих в энергетическом обмене. К ним относятся дегидрогеназы и цитохромные системы, являющиеся переносчиками водорода. Основные фазы выделения биогенного водорода в техногенную среду белковых веществ выражаются биохимическими реакциями, протекающими в процессе обмена веществ и энергии (ассимиляции и диссимиляции) микроорганизмов. Водород адсорбируется на поверхности детали и под действием напряжений и тепловых потоков диффундирует в глубь металла.

Экспериментальные исследования по количественному определению водорода в деталях при трении в культуральной жидкости белковых веществ показали, что содержание водорода в стальных образцах достигает 3,73 – 4,19 мл/100 г.

Авторы разработали метод повышения износостойкости деталей узлов трения машин и оборудования микробиологического и медицинского производств. Метод состоит в газотермическом напылении на рабочие поверхности деталей порошковых самофлюсующихся хромоникелевых сплавов (ГОСТ 21448—75, ТУ 48-19-383—84) и композиций на их основе. Эти сплавы применяют для защиты поверхностей от износа при одновременном воздействии коррозионной среды и высоких температур с

умеренными ударными нагрузками. Такие покрытия повышают износостойкость деталей в обычных условиях трения, но в условиях водородного изнашивания их износостойкость не столь высока. Пришлость прибегнуть к легированию верхнего слоя медью с тем, чтобы инициировать процесс избирательного переноса.

Для повышения прочности сцепления покрытия с подложкой и улучшения физико-механических свойств напыленных покрытий авторы работы применили способ оплавления поверхностей в среде инертных газов [37].

Работа узлов трения в режиме избирательного переноса обеспечивает снижение диффузии водорода в металл, так как сервовитная пленка, состоящая из меди, меньше пропускает водород в поверхность основного материала. Кроме того, медь обладает биоцидностью: она тормозит бактериальный рост микроорганизмов и тем способствует снижению биокоррозионных процессов.

Исследованиями установлено, что покрытия из самофлюсующегося сплава, легированного медью, имеют в 1,3...1,5 раз бóльшую износостойкость по сравнению с покрытием без компонентов меди. Такое повышение износостойкости можно объяснить только за счет снижения биокоррозионного разрушения и приобретения покрытием защитных свойств от наводороживания.

Разработанная технология и оборудование для нанесения покрытий внедрены на предприятиях Республики Беларусь.

13. Водородное изнашивание поршневых колец двигателей внутреннего сгорания

Матюшенко В.Я., Соловей Н.Ф., Тороп В.В. провели исследование водородного износа цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания и показали превалирующую роль как технологического, так и эксплуатационного водорода в изнашивании поршневых колец [30, 40]. Определение содержания в деталях водорода авторы проводили методом вакуум-экстракции.

При работе трущейся пары цилиндр – поршневое кольцо происходит циклическое изменение знакопеременных нагрузок при высоких температурах и давлениях (10—12 МПа — в дизельных, 5,5 МПа — в карбюраторных двигателях; 3000 К).

Такие условия работы приводят к термомеханической деструкции рабочей среды с образованием свободного водорода и последующей адсорбцией его трущимися поверхностями цилиндров и поршневых колец. Периодическое возникновение бегущей волны напряжений (растяжение – сжатие) усиливает насыщение водородом деформируемых при трении приповерхностных объемов металла деталей.

Проведенные исследования показали, что поршневые кольца двигателей Д-50, Д-240, ЗМЗ-24, ЦД-10УД и др. в значительной степени подвержены как технологическому, так и эксплуатационному наводорожи-

ванию. В табл. 6.5 и 6.6 приведено содержание диффузионно-активного водорода в поршневых кольцах отечественного и зарубежного производства в состоянии поставки.

Таблица 6.5

Кольцо	Марка двигателя и покрытие			
	ПД-10УД	Д-50	Д-240	ЭМЗ-24
	пористый хром	пористый хром	твердый хром	молибден
	Концентрация водорода Сн · 10^{-5}м³/кг			
Верхнее	34	14,3	7,55	16,2
Нижнее луженые	2,4	2,09	1,74	4,56

Авторы работы отмечают, что в поршневых кольцах двигателя "Raba-Mann" (Икарус, Венгрия) в процессе эксплуатации концентрация диффузионно-активного водорода увеличивается почти на порядок (с $1{,}30 \cdot 10^5$ до $12{,}2 \cdot 10^5$ м³/кг). Установлено, что различные технологические операции обработки поверхности колец в разной степени влияют на процессы их наводороживания.

Таблица 6.6

Фирма	Кольцо	Сн · 10^{-5}м³/кг	Покрытие
«Рикен»	Верхнее	5,87	Твердый хром
(Япония)	Нижнее	1,6	Фосфатирование
«Нипшон»	Верхнее	9,6	Твердый хром
(Япония)	Нижнее	2,4	Феррокс
«Тэйкоку»	Нижнее	0,56	Фосфатирование
(Япония)			
«Гетце»	Верхнее	14,76	Пористый хром
(ФРГ)	Нижнее	2,64	Фосфатирование

Авторы полагают, что в процессе эксплуатации связанный водород в поршневых кольцах значительно уменьшает износостойкость поршневых колец. С целью снижения такого влияния на износостойкость колец они предложили подвергать кольца обезводороживанию на разработанной ими установке. Установка позволяет не только обезводороживать детали, но и при изучении влияния водорода на износостойкость деталей производить их наводороживание.

Схема установки показана на рис. 6.32.

Она состоит из электропечи *1*, термопар *2*, *3* для контроля температуры в печи и камере термического обезводороживания *9*, водяной рубашки *4*, камеры для среды наводороживания *5* и вакуумной системы *6*, *7* и *8*. Водяная рубашка необходима для нормальной работы герметизирующего уплотнения.

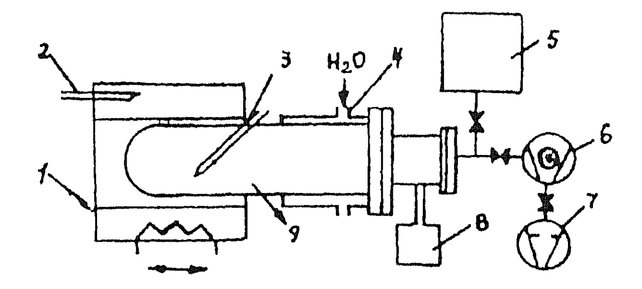


Рис. 6.32. **Схема установки для вакуумного обезводороживания и термического наводороживания:**
1 – съемная печь; *2, 3* – термопары; *4* – водяная рубашка для охлаждения; *5* – камера для среды наводороживания; *6* – диффузионный насос; *7* – форвакуумный насос; *8* – вакуумметр; *9* – камера для термического обезводороживания

Процесс обезводороживания колец осуществляется по следующей методике. Кольца промываются бензином, а затем четыреххлористым углеродом. После этого их помещают в камеру обезводороживания *9*. Камеру герметизируют, соединяют с вакуумной системой и производят откачку до давления $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па. Паралельно с этим включается съемная электропечь и разогревается до температуры 523 К. Достигнутая температура поддерживается на заданном уровне. При достижения вакуума $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па камеру обезводороживания помещают внутрь электропечи. В результате нагрева происходит дегазация газов из колец и удаление их в атмосферу. О начале дегазации судят по падению давления в системе. Окончание дагазации определяется достижением вакуума $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па. После этого выключается электропечь и камера остывает вместе с печью до температуры 293 К. При этой температуре в камеру запускается воздух, снимается камера, кольца извлекаются из камеры и промываются четыреххлористым углеродом.

Проведенные ресурсные испытания двигателей ПД-10УД с обезвороженными кольцами показали увеличение износостойкости этих колец на всех этапах эксплуатации, включая заводскую приработку (для нижних колец около 15%, а для верхних – в 1,7 раза (рис. 6.33), а также снижение удельного расхода топлива до 2% [30].

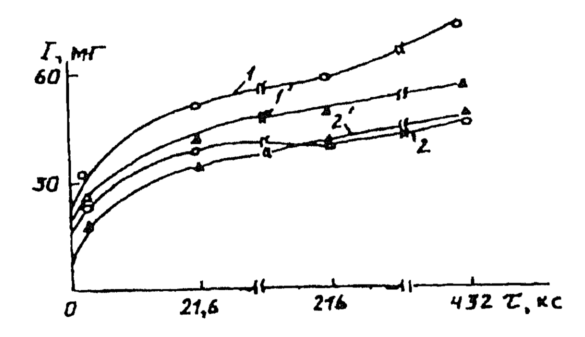


Рис. 6.33. **Зависимость износа поршневых колец от времени эксплуатации:**
1, 1' – серийные верхние и нижние кольца; *2, 2'* – обезводороженные верхние и нижние кольца

Удаление водорода из поршневых колец снижает неоднородность структуры, остаточные напряжения и неравномерность физико-химических свойств приповерхностных слоев, что устраняет вероятность исходных очагов концентрации напряжений и, как следствие этого, улучшение эксплуатационных характеристик поверхностных слоев трущихся деталей.

Добавим ко всему сказанному, что снижение водородного изнашивания цилиндров двигателей внутреннего сгорания наиболее эффективно достигается применением ФАБО цилиндров [35].

14. Водородное изнашивание деталей топливных плунжерных насосов

В работе В.М. Юдина, М.Е. Ставровского и др. [56] показано, что в топливных насосах авиационных двигателей наиболее нагруженными деталями являются детали качающегося узла. В процессе эксплуатации трущиеся поверхности деталей интенсивно наводороживаются. Материалы деталей при работе находятся в постоянном контакте с водородосодержащей смазочной средой. Кроме того, авторами установлено, что в процессе технологической обработки поверхностей деталей происходит их наводороживание. Результаты экспериментов по изучению наводороживания стали Х12М в процессе изготовления плунжеров для насоса представлены в табл. 6.7.

Таблица 6.7

Операция	Содержание водорода в образце, $10^{-5} \cdot м^3/кг$	
	Вакуум-экстракция	Вакуумное плавление
Материал в состоянии поставки	0,06	1,33
Обтачивание и растачивание на токарном станке	0,14	3,78
Термообработка на твердость 60—64 HRCэ	0,48	6,75
Шлифование по наружному диаметру и шлифование сферы	0,58	2,72
Старение[1]	0,39	2,65
Предварительная доводка	0,56	2,71
Окончательная доводка	0,55	2,70
Старение[1]	0,29	2,14

[1] В масле при температуре 160°С в течение 4 ч.

Определение содержания водорода производилось двумя методами: вакуум-экстракцией и на установке Леко РН-2е. Результаты экспериментов показали, что существует предел нагружения, соответствующий резкой интенсификации диффузии водорода в сталь. Так, изменение нагруз-

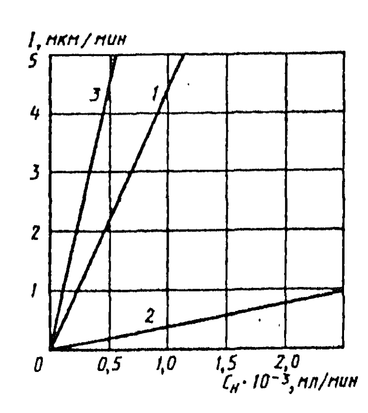
ки на образец из стали Х12М с 20 МПа до 25 МПа приводит к увеличению концентрации в нем водорода в 2, 35 раза, а при аналогичном изменении нагрузки с 25 МПа до 30 МПа интенсивность наводороживания повысилась в 4,5 раза.

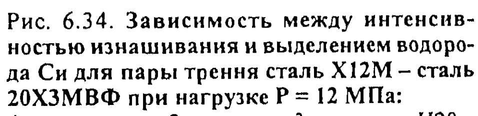
На основании проведенных исследования предложено два способа повышения износостойкости узлов трения топливных насосов.

Первый способ состоит в использовании ФАБО поверхностей трущихся деталей насоса. Второй способ подавления водородного износа основан на введении в состав топлива металлоплакирующей композиции из медьсодержащих соединений. Авторами [56] разработана технология изготовления и введение в топливо композиции на основе соединений меди.

В результате экспериментов была отмечена связь между интенсивностью изнашивания сталей и количеством выделившегося водорода в результате деструкции смазочного материала в установившемся режиме работы (рис. 6.34). Смазочные материалы характеризуются различной деструкцией и количеством выделившегося водорода на единицу износа поверхности стали.

Оптимум концентрации композиции к топливу устанавливался по интенсивностям изнашивания, степени наводороживания материалов деталей и по интенсивности выделения водорода, образованного в результате взаимодействия материалов с топливом. Показано, что все три параметра могут служить критериями оптимизации. Если все три параметра соединить на один график, то получатся единые кривые по отношению к процентной концентрации присадки (рис. 6.35).




Рис. 6.34. **Зависимость между интенсивностью изнашивания и выделением водорода Си для пары трения сталь Х12М – сталь 20Х3МВФ при нагрузке Р = 12 МПа:**
1 — в топливе; 2 — в воде; *3* — в масле И20

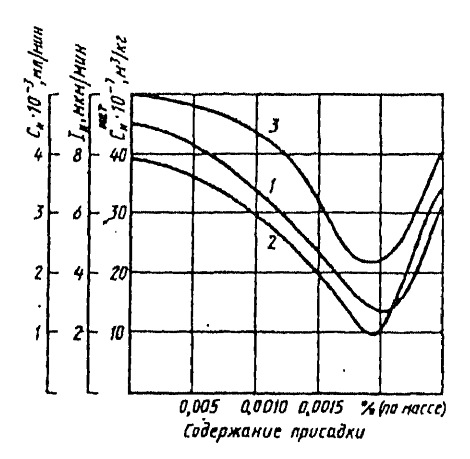


Рис. 6.35. **График к определению оптимального содержания присадки к топливу для пары сталь Х12М – сталь 20Х3МВФ:**
1 – интенсивность изнашивания Iн; *2* – интенсивность выделения водорода при Сн; *3* – содержание водорода в стали Х12М после триботехнических испытаний $C_H^{м}$

Таблица 6.8

Нагрузка, МПа	0	20	25	30
Содержание водорода в стали, 10^{-7} м^3/кг при работе в топливе ТС-1	45	50	117,5	525
При работве в топливе ТС-1 с мелаллоплакирующей присадкой	45	23	28	62

Установлено, что повышение нагрузки при испытаниях в топливе с медьсодержащей композицией вызывает увеличение наводороживаемости сталей в меньшей степени, чем при тех же условиях в товарном топливе. Результаты этих экспериментов представлены в табл. 6.8.

Таким образом, экспериментально доказано, что реализация в узлах трения топливных насосов эффекта избирательного переноса является эффективным методом защиты деталей от водородного изнашивания.

Проведенные выше исследования водородного изнашивания проводились на специальных установках, которые были изготовлены в Московском государственном университете сервиса совместно с ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского. Экспериментальные установки и методика исследований водородного изнашивания описана в работе В.М. Юдина, М.Е. Ставровского, Р.В. Севанчук [56].

Разработанные методы определения водорода позволили определить локальное его содержание по поверхности трения образца после триботехнических испытаний. На рис. 6.36 приведены результаты исследования локального распределения водорода по поверхности образца (ролика) из стали 45, работавшего в контакте со сталью У8А при смазке водой.

Как видно из графика, на дорожках трения содержание водорода значительно выше, чем на остальной поверхности, что подтверждает наличие триботехнического источника наводороживания стали.

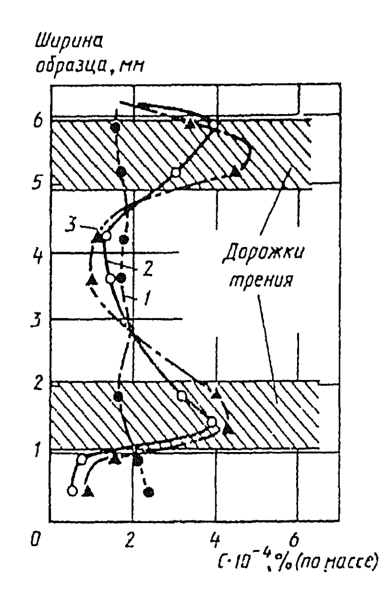


Рис. 6.36. **Кривые распределения содержания водорода Сн (по массе) по поверхности образца стали 45:**
1 – фоновое содержание; *2*, *3* – содержание после 1 ч (*2*) и 24 ч (*3*) триботехнических испытаний

15. Водородное изнашивание стали при высоких температурах

В монографии Г.П. Шпенькова “Физикохимия трения. Применительно к избирательному переносу и водородному износу” [55] описывается явление возникновения низкотемпературного квазижидкого состояния сплава железа с углеродом при насыщении его водородом. Данное явление наблюдалось в тяжелонагруженных тормозах.

Установлено как теоретически, так и экспериментально, что при циклическом трении стали (Ст3) о фрикционную пластмассу происходит разогревание и насыщение водородом в основном тонкого приповерхностного объема стальной детали, где обнаруживается пик температуры (это подробно описано в первой части этого раздела). При достижении температуры порядка 800…1000°С, значительно меньших температуры плавления стали (1500°С) и близких к температурам фазового превращения, гамма-железо в альфа-железо стали переходят в квазижидкое состояние. Это происходит в результате колебания температуры из-за циклического нагружения, которое приводит к пересыщению стали водородом, и в процессе пререстройки атомной решетки. Подобное явление позднее было обнаружено и подробно описано В.И. Шаповаловым и В.Ю Карповым. Авторы показали, что присутствие водорода даже при небольших давлениях снижает предел текучести железа в момент превращения гамма-железа в альфа-железо с 1 до 0, 0003 МПа [51].

В связи с изложенным разрушение поверхности трения стальных дисков в высоконагруженных тормозах может быть в результате ожижения поверхности и ее намазывании на фрикционную пластмассу. Поэтому в таблице 6.1 по механизму водородного изнашивания в графе 5 имеется позиция Б “высокотемпературное” разрушение поверхности.

16. Изнашивание металлов в среде газообразного водорода

Газообразный водород оказывает влияние на интенсивность изнашивания металлов, когда при трении металл насыщается водородом. Если же адсорбированные слои смазочного материала или твердых веществ в процессе трения не будут десорбироваться, освобождая поверхность металла для адсорбции водорода, то последний не окажет усиливающего действия на изнашивание. Это подтверждают результаты испытаний, выполненных Н.В. Мартыновым, на изнашивание фторопласта 4К20, содержащего 20% кокса, в паре со сталями 40Х, 30Х13 и чугуном СЧ 21 в среде воздуха, азота и водорода. Износ наполненного фторопласта в диапазоне давлений 0,5...1,5 МПа при скорости скольжения 2 м/с на воздухе был в 2...4 раза выше, чем в водороде, и в 1,5...2,5 раза больше, чем в азоте (табл. 6.9).

По данным Г.А. Гороховского [17], изучавшего влияние полимеров на процессы диспергирования металлов в различных газовых средах, более интенсивное диспергирование металла происходит в инертной среде.

Таблица 6.9

Среда	Износ металла при трении, г				
	Сталь 45	38Х2МЮА	40Х	30Х13	Чугун СЧ 21
Воздух	54	68	50	116	50
Азот	12	14	10	19	9
Водород	7	6	8	13	6

Исследования поверхностей трения пары металл—фторопласт 4К20 на металлографическом и электронном микроскопах после работы пары в различных газовых средах показали, что поверхность металла покрывается тонкой полимерной пленкой различной плотности.

Толщина пленки 0,1...0,3 мкм. В среде водорода образуется более плотная и равномерная пленка, чем на воздухе. Пленка состоит в основном из фторопласта. Ее плотность и толщина и определяют износ металлической поверхности. Коэффициент трения поверхностей в водороде на 25...30% меньше, чем в воздухе. Сила сцепления пленки с поверхностью в водороде более высокая, чем в азоте и воздухе.

При трении стали по стали газообразный водород приводит к торможению и блокировке движущихся дислокаций и уменьшению пластичности поверхностного слоя [1]. В результате увеличения плотности заблокированных дислокаций выше критических значений происходит разупрочнение поверхностного слоя, снижение износостойкости металла и повышение коэффициента трения.

Влияние газообразного водорода на трение и изнашивание стали 12Х18Н10Т изучал Ю.Н. Пономарев (рис. 6.37).

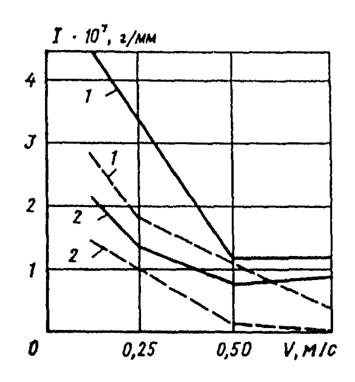


Рис.6.37. **Зависимость интенсивности изнашивания кольца (сплошные линии) и диска (штрихованные линии) от скорости скольжения в водороде (*1*) и в гелии (*2*)**

Испытания велись по схеме кольцо—диск одноименной пары; давление 0,6 МПа, длительность экспериментов 50 мин. Для сравнения эксперименты вели в гелии. Интенсивность изнашивания в водороде больше, чем в гелии. При увеличении скорости скольжения и температуры различие в износостойкости в среде водорода и гелия уменьшается.

Как показали исследования Э.А. Станчука и А.П. Шумилова [41], при подаче водорода в зону резания конструкционных материалов существенно изменяются температурный и силовой режимы резания, стойкость режущего инструмента и характер стружкообразования. В одних случаях целесообразно интенсифицировать действие водорода как газовой технологической среды, в других — его необходимо нейтрализовать.

Подача водорода в зону резания с целью повышения стойкости инструмента приводит к положительному эффекту только в том случае, когда во время резания происходит интенсивное окисление инструмента при работе его в обычной атмосфере или с применением охлаждающей среды, образующей окислительную атмосферу. Это наблюдается при использовании инструмента из стали на основе карбида вольфрама в интервале температур 627...877°С в результате высокотемпературной коррозии. Водород действует как восстановитель и может повысить стойкость инструмента в 1,5...2 раза.

Одним из способов подачи водорода в зону резания является предварительное насыщение им поверхностного слоя режущего инструмента на специальной установке. При резании таким инструментом температура резания может снизиться на 5...15%.

При температурах в зоне резания ниже 677°С при использовании инструментов из быстрорежущей стали водород вызывает как изнашивание режущего инструмента, так и охрупчивание обрабатываемого материала. В этом случае присутствие водорода целесообразно только в обрабатываемой детали на глубине резания.

Водород облегчает стружкообразование. При обработке вязких жаропрочных материалов на никелевой основе образуется сливная стружка, удаление которой требует применения специальных приспособлений и устройств и непрерывного внимания рабочего. При наводороженной заготовке или подаче водорода в зону резания стружка распадается на отдельные элементы и легко удаляется. Как отмечают Э.А. Станчук и А.П. Шумилов, нейтрализовать вредное действие водорода на стойкость режущего инструмента можно путем подачи в зону резания кислорода.

В последнее время в литературе появилось много работ по влиянию электрического поля на изнашивание. Установлено, что магнитная обработка деталей может повысить стойкость режущего инструмента; большое влияние на надежность трущихся деталей оказывает вибрация, особенно с большой частотой и малыми амплитудами; на изнашивание деталей влияют величина и направление тепловых потоков.

Можно полагать, что наличие водорода в зоне фрикционного контакта будет связующим звеном электрических магнитных, вибрационных и тепловых явлений, влияющих на износостойкость металлических тел. Именно водород обладает силой, способной разрушить самые прочные материалы, но поскольку он всегда заряжен положительно, направление его движения в зоне фрикционного контакта зависит от полей, которые на него воздействуют.

Связь износостойкости деталей с магнитной обработкой и водородом впервые установлена Г.И. Сурановым и Д.Н. Гаркуновым [14]. Повышение долговечности намагниченных деталей и инструмента обусловлено взаимодействием возбужденных молекул водорода, появляющихся в зоне контакта трущихся поверхностей, с магнитным полем. Очевидно, эффект повышения износостойкости деталей и инструмента магнитной обработкой зависит от направления и напряженности магнитного поля,

обеспечивающего быстрый и полный отвод возбужденных молекул и атомарного водорода из зоны контакта поверхностного слоя.

Интересное исследование было выполнено Л.В. Беспрозванным, Ю.Д. Соколовым, Федорущенко и др. по механизму изнашивания коррозионно-стойкой стали в водороде[5, 6]. Авторы изучили разрушение коррозионно-стойкой стали 07Х16Н7 с твердостью HRC 42 при трении в среде газообразного водорода и гелия. Гелий был выбран как контрольная среда, имеющая близкие к водороду физические свойства и не оказывающая существенное влияние на механические свойства сталей. Испытанию подвергались одноименная пара, в которой сферический индентор скользил по плоскости при возвратно-поступательном движении.

Выбранная схема и режимы трения (нагрузка 60 Н, скорость скольжения 0,01 м/с) приводили к заеданию пары трения, при котором выявлена наибольшая чувствительность исследуемого материала к водороду. Установлено, что при нормальных условиях (температура 293°К, давление газовой среды 0,1 МПа) интенсивность изнашивания в водороде в 2...3 раза выше, чем в гелии.

Измерение размеров частиц износа показало, что при водороде они имеют меньшие размеры, чем при гелии, что объясняется более хрупким характером разрушения поверхности. Максимальные размеры частиц изнашивания в гелии и водороде 500 и 60 мкм соответственно. Это свидетельствует, по мнению авторов, что характер изнашивания поверхности связан еще и с абразивным действием частиц на поверхность трения.

Специальные исследования подтвердили значительное влияние абразивного изнашивания на суммарный износ при трении в водороде. На рис. 6.38 приведены кривые увеличения износа по массе во времени при непрерывной работе образцов (кривая *1*) и в случае периодического останова через каждые 50 циклов (кривая *2*) с очисткой поверхности трения от продуктов изнашивания. При частом удалении продуктов износа скорость изнашивания заметно уменьшается.

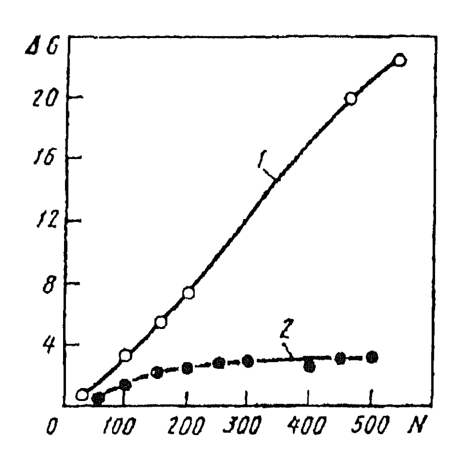


Рис. 6.38. **Зависимость износа *G* стали 07Х16Н6 от числа циклов нагружения *N* при испытаниях в среде водорода (*1*) и в среде водорода с остановками через каждые 50 циклов (двойных ходов индентора) и очистки пары трения от продуктов изнашивания (*2*)**

Характерным примером, свидетельствующим о механизме изнашивания отслаиванием, может служить частица износа (рис. 6.39), обнаруженная на поверхности трения в момент отделения ее от детали.

Как видно из рис. 6.39, частица изнашивания пронизана сетью трещин, по которым впоследствии происходит ее дробление, причем толщина слоев (1...5 мкм) соответствует окончательной частице изнашивания.

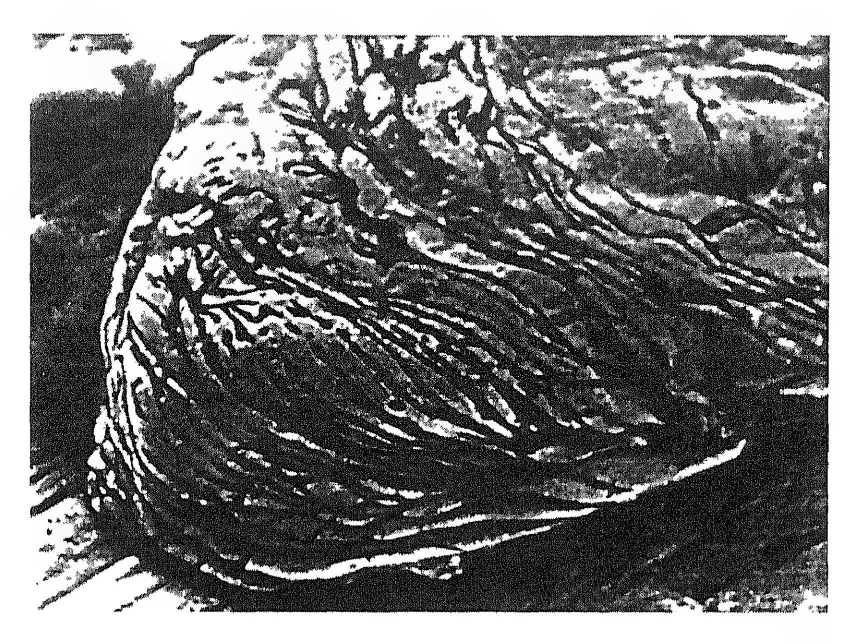


Рис. 6.39. **Частица износа, пронизанная микротрещинами ×1000**

Механизм изнашивания отслаиванием приповерхностных слоев материала рассмотрен в работах [58, 59] и характеризуется наличием подповерхностных трещин, образованных в результате трения. Однако механизм и кинетика образования подобных трещин исследованы недостаточно. Авторы работы [5, 6] провели тщательный металлографический анализ структуры приповерхностных слоев нержавеющей стали при изнашивании ее в среде водорода и пришли к выводу, что под поверхностью трения на некоторой глубине (2...8 мкм) создается пористость в виде "трубок", которые образуются путем слияния отдельных трещин. Этот дефектный слой образуется быстрее в среде водорода, чем в среде гелия.

Авторы отмечают, ссылаясь на работы [60, 61], что водород при пластической деформации проникает вглубь металла благодаря трубчатой диффузии по ядрам образующихся дислокаций или переносом атомов водорода движущимися дислокациями. При этом скорость переноса атомов водорода благодаря своеобразному "дислокационному транспорту" может быть существенно выше, чем скорость диффузии по кристаллической решетке. Количественная модель локализации водорода в дефектах, служащих "ловушками" приведена в работе [62].

17. Защита деталей от водородного изнашивания

17.1. Магнитная защита

Повышение долговечности намагниченных деталей обусловлено взаимодействием заряженных частиц водорода, возникающих при трении в зоне контакта, с магнитным полем. При этом эффект износостойкости, возникающий от магнитной обработки, зависит от направления и заряженности магнитного поля, обеспечивающих быстрый отвод ионов и атомарного водорода из зоны контакта.

Как отмечается в работе [13], направленная диффузия водорода в сторону высоких растягивающих напряжений и к вершинам микротрещин в материалах деталей при деформировании и трении может быть обусловлена также проявлением и изменением местных локальных полей и их градиентов. На это указывают такие известные явления, как изменение магнитных свойств (электросопротивления, магнитной проницаемости, коэрцитивной силы) ферромагнитных материалов при растворении в них водорода. Поэтому естественно предположить наличие обратного взаимодействия – влияние магнитного поля на поведение водорода в металлах. Воздействие магнитного поля на поведение водорода, выделяющегося с поверхности образцов, можно наблюдать с помощью эффекта Рассела [42].

В связи с тем, что свободный водород в металлах находится в ионизированном состоянии, поведение его подчиняется законам движения заряженной частицы, находящейся в магнитном поле и определяется величиной и направлением изменяющихся магнитных и электрических полей, проявляющихся в структуре металла.

Поведение активного водорода во внешнем активном поле показано на автографе стального образца (рис. 6.40), на котором хорошо видны следы интенсивного дрейфового движения свободного водорода, выделяющегося с поверхности образца, расположенного в магнитном поле постоянного магнита. Автограф получен на предваительно засвеченной фотопластинке, которая выдерживалась в темноте в течение 30 мин над поверхностью образца, смоченной соляной кислотой, на расстоянии 2,0...2,5 мм [43].

Такие же следы оставляет водород, выделяющийся с поверхности стального образца, через который пропускали электрический ток.

Проведенные испытания на машине трения МИ-1М на износостойкость пары трения стальной ролик – чугунный вкладыш в режиме граничной капельной смазки (одна капля в минуту) показали, что созданием постоянного магнитного поля в зоне трения можно уменьшить вероятность задира и схватывания трущихся поверхностей в период приработки и уменьшить скорость изнашивания в течение последующей работы.

Схема создания внешнего магнитного поля в зоне трения представлена на рис. 6.41 [33].

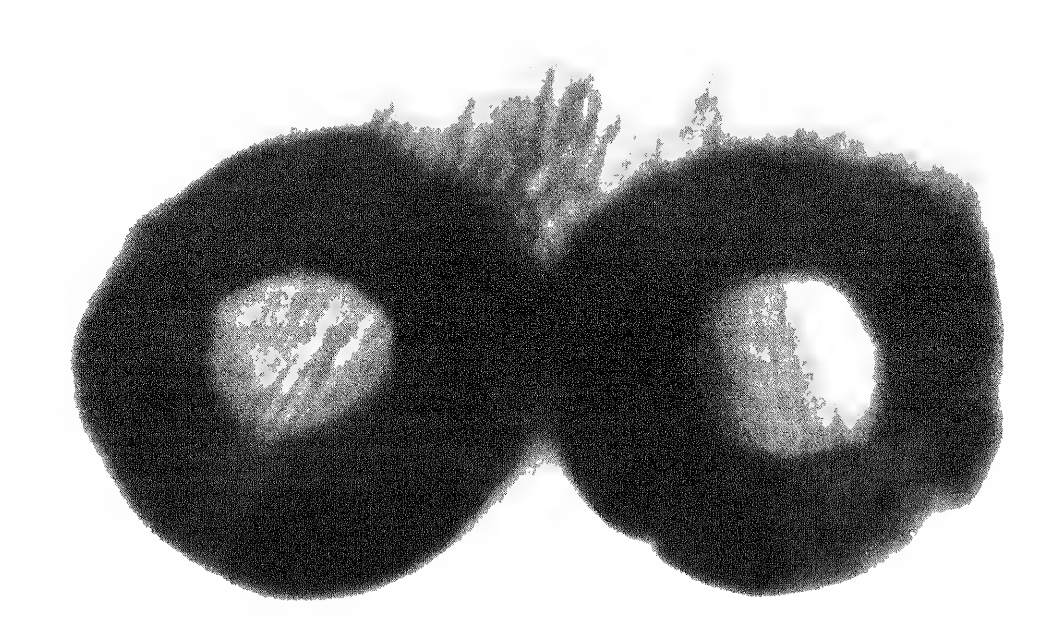


Рис. 6.40. **Автограф движения свободного водорода, выделяющегося на поверхности стального образца в магнитном поле**

Тесная корреляционная связь между скоростью изнашивания образцов и магнитными явлениями в зоне трения установлена специальными магнитометрическими измерениями в процессе испытаний на машине трения [34].

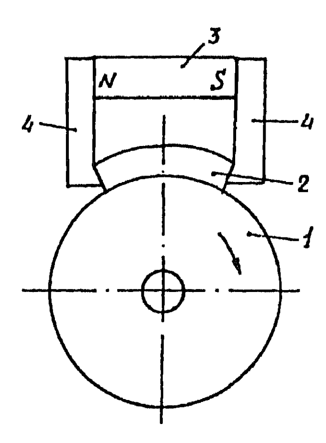


Рис 6.41. **Схема создания внешнего магнитного поля в зоне трения (контакта) для снижения водородного износа деталей:**
1 – стальной ролик; *2* – чугунный вкладыш; *3* – магнит; *4* – магнитопроводы.

17.2. Влияние легирующих элементов

По защите легирующими элементами конструкционных сталей от водорода (имеются в виду прочностные свойства) опубликована довольно большая литература, однако в ней не учитываются потребности в защите деталей узлов трения.

Магнитное состояние, доменная структура и концентрация магнитных силовых линий, тепловой поток и напряжения, определяемые в значительной степени процессом трения и влияющие на поведение водорода в металле, зависят от структуры материала, состава и количества легирующих присадок. Легированные стали обычно весьма быстро теряют пластичность при малых концентрациях водорода.

Магнитные свойства высокопрочных углеродистых мартенситных сталей существенно влияют на поступление, распределение и поведение водорода в структуре металла, а в результате взаимодействия его с углеродом, в свою очередь, изменяются магнитная структура, чувствительность к наводороживанию и прочностные характеристики стали [42].

Особенно сильное влияние на наводороживание оказывают легирующие редкоземельные элементы, микродобавки которых в сталь многократно повышают ее коррозионную стойкость. В случае выделения этих элементов на катоде они действуют как ингибиторы, резко замедляя процесс электролитического наводороживания образцов и деталей. При этом следует отметить высокую коэрцитивную силу и удельную магнитную мощность материалов, содержащих редкоземельные элементы: церий, самарий, лантан, итрий, а также элементы с большой разностью порядковых номеров и атомных радиусов, например, платина (78) и кобальт (27) или самарий (62) и кобальт (27). Необходимо указать также на исключительно высокую магнитострикцию материалов с редкоземельными элементами (в сотни раз большую, чем у других магнитных материалов) и на высокую окклюзию водорода.

При выделении этих легирующих элементов на поверхности деталей или образцов поверхностные слои металла с сильными магнитными свойствами могут выполнять роль защитных экранов, препятствующих проникновению водорода в глубь металла, и предотвращать его наводороживание.

Приведем пример повышения износостойкости рабочих органов бисерных мельниц, работающих в условиях водородоабразивного изнашивания [10].

Бисерные мельницы служат для тонкого измельчения мелющими телами (бисером) красителей, пигментов и других подобных материалов в жидких средах в анилинокрасочном производстве, в производстве масляных, летучесмоляных и эфироцеллюлозных эмалей, а также паст, суспензий и других химических продуктов.

Эти мельницы характеризуются непрерывным механическим измельчением (диспергированием) крупнозернистых агрегатов, грубых суспензий, получаемых при смешении сухих пигментов с пленкообразующими веществами.

Конструкции бисерных мельниц, выпускаемые заводом Дмитровградхиммаш, имеют вертикальный цилиндрический корпус со сменным вкладышем и рубашкой охлаждения, вал с набором металлических дисков, загрузочный и разгрузочный патрубки и привод. Корпус мельницы заполнен на 50...60% бисером из специального стекла диаметром до 2 мм. При работе мельницы пигментная суспензия (паста) подается насосом в нижнюю часть корпуса мельницы. При вращении ротора смесь бисера с пастой совершает вихревое движение в зоне перетира, где шары бисера не только скользят по поверхности диска, но и перекатываются друг относительно друга. При соударении бисера и частиц пигмента с дисками, выполненными из износостойкой стали 40Х13, выделяется большое количество тепла; процесс имеет кавитационно-пульсационный характер.

При работе в углеводородных суспензиях диски вала и вкладыш корпуса подвергаются интенсивному изнашиванию, что снижает ресурс работы и надежность мельниц, повышает расходы на ремонт. Диски из стали 40Х13 за короткое время изнашиваются практически полностью.

Насыщение водородом стальных дисков и связанная с ним потеря износоустойчивости являются следствием разрушения карбидов железа (цементита) в соответствии с реакцией:

$$Fe_3C + 2H_2 \rightarrow 3Fe + CH_4$$

При разрушении карбидов выделяется метан в дефектах кристаллической решетки металла, который приводит к ее межкристаллитному растрескиванию. Металлографический анализ показал, что в материале дисков образуются обезуглероженные зоны феррита, окруженные карбидными цепочками, что свидетельствует о насыщении водородом.

Выделение водорода при трении в углеводородной среде можно установить также химическим анализом по определению изменения содержания непредельных углеводородов в смеси, поступающих в мельницу и выходящей из нее.

При экстремальных условиях трения из части предельных углеводородов в смеси разрываются связи С—Н с образованием непредельных углеводородов и водорода (по типу процессов дегидрирования). При этом в смеси углеводородов образуется некоторое количество непредельных углеводородов, которые легко присоединяют по месту образования двойной связи молекулу галогена, например иода. Таким образом, соединение непредельных углеводородов в смеси можно охарактеризовать иодным числом – числом граммов иода, присоединившегося к 100 г смеси. По количеству иода, способного присоединиться к непредельным углеводородам, можно судить о их содержании в смеси, следовательно, оценить соотношение выделяющегося при трении водорода [44].

Защитой от водородного насыщения стали является введение в нее легирующих элементов, образующих карбиды, более стойкие, чем цементит. В частности, увеличение содержания хрома с образованием карбидов хрома резко увеличивает водородостойкость [22].

Особенно эффективно применение покрытий, содержащих хром, вольфрам, никель, насыщенных карбидами и имеющих более низкую водородопроницаемость, чем основной металл (железо в стали). Например, вольфрам совсем не поглощает водород, а у хрома в отличие от железа наблюдается экзотермическое поглощение водорода, характеризующееся тем, что с ростом температуры наводороживание его уменьшается. Такие покрытия защищают детали от проникновения водорода и препятствуют его взаимодействию с карбидной составляющей стали. В то же время высокое содержание карбидов хрома и вольфрама обуславливают стойкость покрытия к абразивному изнашиванию. С целью экономии легированной стали для дисков бисерной мельницы была рекомендована сталь Ст3 с защитными покрытиями.

В качестве покрытия дисков диаметром 200 мм и толщиной 20 мм были приняты хромоникелевые и вольфрамовые твердые сплавы. Одним из исходных материалов для покрытия методом плазменного напыления служил порошок марки СНГН-55 (ГОСТ 21448—75), содержащий в %: C – 0,7…1,0; Cr – 14…17; B – 3,2…4,0; Si – 3,5…4,5; Mn – до 1; Fe – до 4; Ni – остальное.

После нанесения покрытий с помощью плазмотрона (температура 8000...12000°С) производилось последущее его оплавление в вакуум печи с целью перевода покрытия в монолитное состояние и создание прочной металлической связи с материалом основы. При этом толщина покрытия составляла 0, 45...0,5 мм, твердость HRC 54.

Опытно-промышленные испытания упрочненных рабочих органов проводили на бисерной мельнице МДП-60А вместимостью 50 л, с частотой вращения 980 об/мин, мощностью привода 20, 8 кВт в промышленном производстве при диспергировании железоокисных пигментов типа эмали ПФ-266.

Испытания показали, что упрочнение рабочих органов бисерных мельниц твердосплавными покрытиями обеспечивает повышение качества (сортности) вырабатываемых красок и эмалей. За счет подавления водородного разупрочнения рабочих органов и снижения водородоабразивного изнашивания достигнуто повышение их износостойкости в 3…3,5 раза, что дало на одном предприятии ВПО "Союзкраска" экономию до 70 т легированной стали в год [10].

Электрохимические методы защиты. В практике эксплуатации машин большое место занимает случай защиты от водородного износа, когда применение легированных сталей экономически невыгодно, а применение ингибиторов коррозии практически невозможно (например в землеобрабатывающих органах или кормоперерабатывающих машинах). В этом случае защита осуществляется с помощью электрохимических методов.

При электрохимической коррозии растворение металла включает два параллельных процесса: анодный $Me \rightarrow Me^{z+} + ze$ и катодный $D + ze \rightarrow$ $\rightarrow D\,ze$, где D – деполяризатор, присоединяющий к себе z электронов. Реакция катодной деполяризации идет при взаимодействии электронов с ионами водорода или другими анионами.

Важно, чтобы реакция присоединения электронов не пошла с металлом, тогда произойдет его поглощение – абсорбция. Принимают во внимание две модели этого процесса. В соответствии с одной из них водород проникает в металл в форме протонов в одном элементарном акте:

$$H^+ + Me + e \rightarrow Me\ H\ абс\ .$$

По другой модели абсорбции предшествует его адсорбция в атомной форме на поверхности металла:

$$Me\ H\ адс \rightarrow Me\ H\ абс\ .$$

Первая реакция конкурирует со стадией разряда выделения водорода, вторая реакция конкурирует со стадией электрохимической десорбции реакции выделения водорода. Опытные данные подтверждают правильность второй модели [19].

В процессе корродирования металлов в кислых средах характерна реакция водородной деполяризации $H^+ + e \rightarrow H$, а для нейтральных и щелочных сред — реакция кислородной деполяризации:

$$H_2O + ½O_2 + 2e \rightarrow 2OH\ .$$

Присутствие щелочной среды в зоне трения может приводить к соединению водорода с гидроксильной группой и мешает его поглощению сталью. В процессе трения возможно и соединение кислорода с водородом.

Катодная поляризация достигается введением в электролитически замкнутый контур металла более активного, чем защищаемый металл.

В работе [50] приводятся исследования контактной усталости закаленных и незакаленных роликов из стали 45. Испытания проводились на машине трения СМЦ при скорости скольжения 2 м/с, что соответствовало 57600 циклам в час. Нагрузка на ролик составляла 1500 Н, давление в зоне контакта 740 МПа. При испытаниях использовали ролики с наружным диаметром 40 мм и шероховатостью поверхности Ra 1,625 мкм. Смачивание ролика коррозионно-активной средой производилось его погружением в эту среду. В процессе исследования измерялся весовой износ роликов после 0,5 млн циклов передеформирования.

Испытания на контактную усталость проводились со следующими средами:

	pH
Пресная вода (водопроводная)	6,9
Морская вода (синтетическая)	6,7
Растительный сок	6,2
3%-ный раствор уксусной кислоты	2,5
3%-ный раствор едкого натра	10,8

Для осуществления катодной поляризации стальных образцов применялся цинковый дополнительный электрод площадью $8 \cdot 10^{-4}$ м^2, как химически более активный, чем сталь.

Результаты испытаний приведены на рис. 6.42.

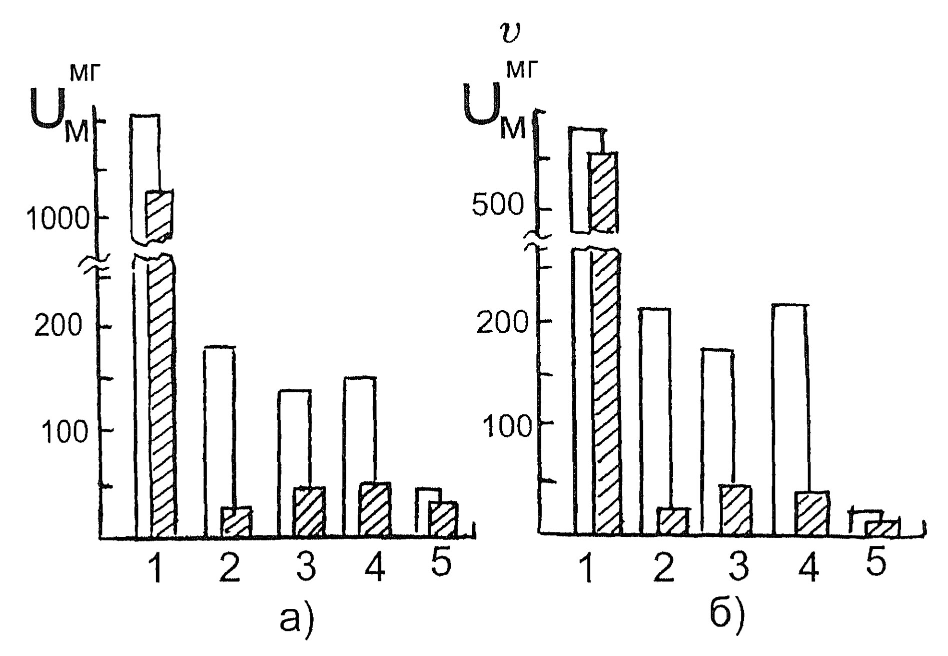


Рис. 6.42. **Влияние среды на величину износа $U_и$ роликов из незакаленной (*а*) и закаленной (*б*) стали 45 при трении без электродов и при катодной поляризации (заштриховано):**
1 – раствор уксусной кислоты; *2* – морская вода; *3* – пресная вода; *4* – растительный сок; *5* – раствор едкого натра

Измерение микротвердости роликов показало, что использование цинкового электрода предотвращает разупрочнение поверхностных слоев, происходящее, когда электрод не устанавливался.

В случае, когда испытаниями подвергаются ролики из закаленной стали 45, защитное действие катодной поляризации проявляется еще эффективнее (рис. 6.42, *б*). Износ в пресной воде с введением цинкового электрода уменьшается в 4,4 раза, а в морской воде – в 20 раз. Авторы работы [50] объясняют это тем, что закаленная сталь больше, чем незакаленная подвержена охрупчиванию в результате наводороживания.

Морская и пресная вода, растительный сок являются нейтральными, либо слабокислыми и в них наиболее вероятной реакцией является реакция кислородной деполяризации, способная связыванию водорода. Такие же испытания роликов на износостойкость при трении в среде 3%-ного раствора уксусной кислоты с pH 2,5 показали, что поляризация с помощью цинкового электрода не оказывает существенного влияния на износостойкость стали. Процесс наводороживания даже при катодной поляризации стали не прекращается, так как в данном случае на поверхности трения протекают катодные реакции водородной поляризации, и удельное содержание водорода у поверхности роликов даже выше, чем после трения без введения электродов. Анализ микротвердости поверхностных слоев также показывает, что катодная поляризация стали при трении в кислой среде не предотвращает разупрочнения поверхностных слоев, которое происходит на глубину до 40 мкм. Следовательно, в кис-

лых средах катодная поляризация стали не может быть использована для защиты.

В среде 3%-ного раствора едкого натра pH 11,8 катодная или анодная поляризация стальных роликов за счет более активных, чем сталь, электродов не оказывает существенного влияния на износостойкость. Заметного наводороживания роликов при трении в щелочной среде не происходит. Поэтому износ в большей степени не повышается. Износ роликов при трении в нейтральных средах в случае катодной поляризации соизмерим с износом при трении в щелочной среде. Это объясняется тем, что в обоих случаях не происходит наводороживания и вызываемого им разупрочнения стали.

Авторы отмечают [50], что в случае абразивного изнашивания с увеличением давления снижается степень влияния поляризации на износостойкость стальных образцов. Если при давлении 0,1 МПа поляризация повышает износостойкость стали в 2,0...2,5 раза, то при давлении 0,2 МПа она уже практически не оказывает влияния на износостойкость. Это объясняется тем, что увеличение удельного давления приводит к снижению степени влияния сред.

17.3. Другие методы подавления водородного изнашивания

1. Наклеп стали увеличивает поглощение водорода. Холоднодеформированная сталь может поглотить в 1000 раз больше водорода, чем отожженная. Водородная хрупкость проявляется в большей степени в сталях ферритного класса. В закаленных или слабоотпущенных углеродистых низколегированных сталях хрупкое разрушение может быть даже при ничтожном количестве водорода.

Необходимо, где возможно, исключать из узлов трения полимеры, способные к быстрому разложению и выделению водорода.

Введение в тормозные материалы на основе полимеров измельченной на куски латунной проволоки благоприятно сказывается на фрикционные характеристики. В процессе интенсивного торможения при термомеханической деструкции полимера выделяющийся водород будет реагировать с окисной пленкой латунной проволоки. Это уменьшит поток водорода в стальное или чугунное контртело и тем самым отодвинет границу катастрофического водородного разрушения сопряженных поверхностей.

2. Полезно применять для узлов трения, если имеется вероятность водородного изнашивания, смазочные материалы, которые мало подвержены гидрогенизации. Уменьшение в керосинах меркаптанов, тиоспиртов уменьшает возможность протекания химической реакции на поверхностях трения пары сталь—бронза и может исключить образование водорода.

В качестве присадок к смазывающим жидкостям и фрикционным полимерным материалам могут быть введены кремнийорганические соединения (силаны), содержащие несколько атомов хлора, которые легко

соединяются с выделившимся водородом. С уменьшением числа атомов хлора эффективность присадки снижается.

Заслуживают внимания работы, проведенные Ю.Н. Шехтером, В.М. Юдиным, И.Ю. Ребровым и др. [53] по разработке антифрикционно-защитных противоизносных композиций (АЗПК) – смазочных материалов третьего поколения, как их назвали авторы. Эти материалы способны снизить потери на трение и уменьшить все виды изнашивания. Для оценки этого свойства смазочных материалов были созданы методы оценки таких малоизученных видов изнашивания, как усталостный и электрохимический питтинг, циклическая коррозионно-циклическая усталость, коррозия при трении, коррозионное растрескивание и водородное изнашивание.

АЗПК должны предотвращать появление очагов поражения металлических поверхностей и зарождения микротрещин.

3. В некоторых случаях в смазывающие жидкости полезно вводить ингибиторы проникновения водорода. Многие полярные органические соединения тормозят проникновение водорода в металлы при коррозии и катодной поляризации. Одной из эффективных и хорошо изученных присадок является дибензилсульфоксид, который при сильно отрицательных потенциалах катодов (для железа приблизительно 0,76 по водородной шкале) восстанавливается в дибензилсульфид, адсорбируясь на поверхности металла. Механизм действия органических ингибиторов проникновения водорода состоит в том, что при электролизе ионы водорода разряжаются на внешней поверхности адсорбированного слоя органических молекул, в результате нарушается непосредственный контакт ионов водорода с поверхностью катода..

В парах трения сталь — медный сплав необходимо исключать из последнего примеси сурьмы, соединений мышьяка, серы и др., способствующие выделению водорода.

4. Коррозионные процессы в узлах трения можно подавлять путем изменения режимов работы: снижением температуры, скорости скольжения и давлений. Так, для пары трения бронза—сталь при работе в глицерине или в спиртоглицериновой смеси основным фактором наводороживания является температура. При 65 ... 70 °С наводороживание происходит в несколько раз интенсивнее, чем при температуре 60 °С.

Снижение температуры в паре трения тормозная колодка из пластмассы 22 — чугунный барабан авиационного колеса уменьшает интенсивность водородного изнашивания поверхностей трения.

5. Проникновение водорода можно существенно снизить, если из зоны наводороживания удалить (при их наличии) вещества, способствующие проникновению водорода: сероводород, фосфорводород, соединения мышьяка, селена, сурьмы, теллура. Действие сероводорода состоит в том, что он тормозит реакции рекомбинации атомарного водорода. На основании изложенного выше предложены новые подходы в создании рецептов износостойких и эффективных фрикционных пластмасс [20].

6. В ряде случаев водородное изнашивание может быть снижено введением в материалы медьсодержащих добавок, которые реализуют режим ИП. Введение закиси меди в древесные материалы снижает выделение водорода при трении, а латунирование титана повышает его задиростойкость при работе со сталью.

7. Оригинальный метод борьбы с водородным изнашиванием разработан Ю.А. Евдокимовым, В.И. Колесниковьм и В.И. Тер-Оганесяном. Они установили, что при трении пластмассовой детали о стальную, в зависимости от состава пластмассы, детали могут заряжаться: стальная отрицательно, а пластмассовая положительно или наоборот. Когда стальная деталь заряжается отрицательно, происходит ее усиленное наводороживание (водород заряжен положительно) и интенсивное разрушение при трении. Чтобы избежать водородного изнашивания, достаточно в пластмассу ввести небольшое количество другой электроотрицательной пластмассы, например ПТФЭ. В этом случае стальная деталь будет заряжена положительно, а пластмассовая — отрицательно. Водород не будет проникать в стальную деталь.

Разработана технология получения нового фрикционного материала применительно к тормозным колодкам колес железнодорожного транспорта. Проверка фрикционного материала в эксплуатационных условиях дала положительные результаты.

8. В целях "подавления" водорода во время его образования в зоне фрикционного контакта при создании новых фрикционных материалов для автомобилей во фрикционную пластмассу вводили закись меди или другие добавки, которые связывались с водородом химически. Износостойкость фрикционного материала и сопряженного контртела при этом повышается в несколько раз. И самое главное, исчезает один из основных пороков фрикционного материала— намазывание на него стали или чугуна.

9. Разработан метод удаления технологического водорода путем полирования поверхностного слоя детали (последняя технологическая обработка). При полировании помимо незначительного удаления поверхностного слоя детали верхние слои металла нагреваются и деталь подвергается своеобразной термической обработке. Поскольку максимум температуры при полировании находится на поверхности, водород диффундирует на поверхность и десорбируется.

На одном из заводов у шестеренного насоса, перекачивающего топливо, на рабочей поверхности зубьев одной из шестерен происходил небольшой вырыв материала, а на сопряженной поверхности других зубьев — наплав этого материала. Исследованиями было установлено наличие большого количества технологического водорода в зубьях шестерен. Введение небольшого припуска при изготовлении шестерен и удаление его при окончательном полировании ликвидировало дефект.

1. Общие сведения

Абразивным материалом именуют минерал естественного или искусственного происхождения, зерна которого имеют достаточную твердость и обладают способностью резания (скобления, царапания). Абразивным изнашиванием называют разрушение поверхности детали в результате ее взаимодействия с твердыми частицами при наличии относительной скорости. В роли таких частиц выступают:

а) неподвижно закрепленные твердые зерна, входящие в контакт по касательной либо под небольшим углом атаки к поверхности детали (например, шаржирование посторонними твердыми частицами мягких антифрикционных материалов);

б) незакрепленные частицы, входящие в контакт с поверхностью детали (например, насыпные грузы при их транспортировании соответствующими устройствами, абразивные частицы в почве при работе почвообрабатывающих машин и т.д.);

в) свободные частицы, пребывающие в зазоре сопряженных деталей;

г) свободные абразивные частицы, вовлекаемые в поток жидкостью или газом.

Абразивному изнашиванию подвергаются детали сельскохозяйственных, дорожно-строительных, горных, транспортных машин и транспортирующих устройств, узлы металлургического оборудования, металлорежущих станков, шасси самолетов, рабочие колеса и направляющие аппараты гидравлических турбин, лопатки газовых турбин, трубы водяных экономайзеров и паровых котлов, лопасти дымососов, трубы и насосы земснарядов, бурильное оборудование нефтяной и газовой промышленности, подшипники валов гребных колес, подшипники гребных валов судов при плавании на мелководье и т.п.

На процесс абразивного изнашивания может влиять природа абразивных частиц, агрессивность среды, свойства изнашиваемых поверхностей, ударное взаимодействие, нагрев и другие факторы. Общим для абразивного изнашивания является механический характер разрушения поверхности.

Абразивное изнашивание вызывает почва, грунт, руда, уголь и порода, зола, пыль, попавшие на поверхность трения, металлическая стружка, окисные пленки, закрепленные на поверхности трения или разрушенные, нагар и продукты износа, в особенности выкрошившиеся частицы твердых структурных составляющих.

Абразивные частицы могут иметь различную форму и быть самым различным образом ориентированы относительно сопряженной поверхности. Способность абразивного зерна вдавливаться в поверхность зависит не только от соотношения их твердостей, но и от геометрической

формы зерна. Так, зерно выпуклой поверхностью или острым ребром может быть вдавлено, даже без повреждений, в плоскую поверхность более твердого тела. Это объясняет факт износа металла абразивными частицами с твердостью, меньшей его твердости.

Иногда твердость окисных плёнок больше твердости самих металлов (рис. 7.1).

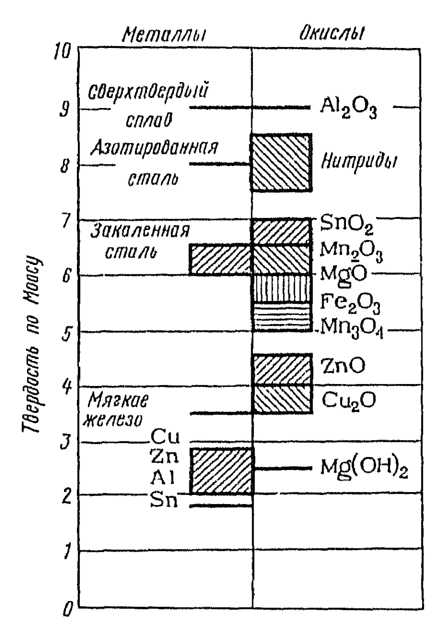


Рис. 7.1. **Твердость металлов и окислов по шкале Мооса**

Наибольшую твердость (9) имеет окисел алюминия Al_2O_3, твердость самого алюминия невелика (~2). Вследствие этого при трении алюминия по стали окисные пленки, а также продукты разрушения этих пленок могут вызвать сильный износ даже самых твердых сталей. Мягкий окисел почти не оказывает абразивного действия на другую поверхность. Магний образует очень мягкий окисел $Mg(OH)_2$, поэтому износ магнием более твердых металлов невелик даже при благоприятных условиях образования окисла. Это обстоятельство частично объясняет, почему поршни из магнитных сплавов меньше царапают и задирают стенки цилиндров, чем поршни из алюминиевых сплавов. Чисто абразивное изнашивание окислами алюминия встречается в трущихся парах сталь, покрытая хромом, — алюминиевый сплав, применяемых в некоторых узлах самолетных конструкций из-за неизменного стремления к снижению массы.

Окислы железа участвуют в абразивном изнашивании узлов металлургического оборудования, работающих при высокой температуре и недостаточном смазывании.

2. Изнашивание поверхностей деталей твердыми зернами

Допустим, что абразивные частицы входят в контакт с поверхностью металлической детали по касательной. Механизм изнашивания в этом случае представляется таким. Абразивные частицы (зерна) упруго деформируют металл, оставаясь целыми или разрушаясь; в зависимости от структуры абразивного материала и среды зерна могут вдавиться в эту среду, повернуться или даже выйти из зоны контакта, как, например, частицы кварца в почве под давлением ножа грейдера. Абразивная частица вдавливается в металл детали, если она обладает большей твердостью, чем металлическое зерно, и прочностью, достаточной для воспринятия нагрузки, необходимой для вдавливания в металл, и если ее достаточно

поддерживает основа. Внедрившаяся частица при движении относительно поверхности может процарапать риску или срезать микроскопическую стружку. Резание может начаться только при определенном отношении глубины проникновения абразива к радиусу скругления внедрившейся кромки [13]. Так, для стали Ст.3 это отношение должно быть больше 0,16 при сферической кромке. Если бы микрорезание было ведущим процессом разрушения поверхности при абразивном изнашивании или даже сопутствующим, то интенсивность изнашивания была бы настолько высокой, что рабочие органы (например, строительных и дорожных машин) выходили бы из строя после весьма малого времени работы, исчисляемого несколькими часами.

Частота внедрения абразивных частиц мала, а основное количество внедряющихся частиц производит царапающее действие с оттеснением материала в стороны. По пути царапания свободная частица может повернуться и прекратить выдавливание материала; она может дойти до твердой структурной составляющей сплава, "перешагнуть" через нее и вновь начать царапание. Ее выступ может вырвать твердую составляющую, обломиться, частица может раздробиться. Если зерно закреплено, например зерно кварца в камне, и повернуться не может, то в этом случае канавки будут наиболее глубокими (0,001...0,02 мм) при небольшой длине (0,05...0,5 мм) [3,14].

Дно канавки наклепывается. Когда вся рабочая поверхность наклепается, сопротивление внедрению повысится. Если внедрение полностью не исключается, то после многократной пластической деформации наступит охрупчивание материала.

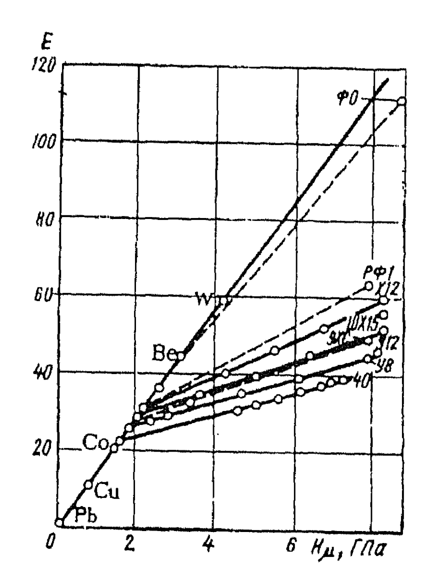


Рис. 7.2. **Зависимость относительной износостойкости при трении об абразивную поверхность от микротвердости технически чистых металлов и сталей в термически обработанном состоянии**

Результаты обширных лабораторных исследований по изучению износостойкости чистых металлов, структурно-неоднородных цветных сплавов и сталей при трении о твердые зерна, неподвижно закрепленные на сопряженной поверхности при отсутствии нагрева и агрессивной среды, приведены в работе [21]. Изнашивание производилось о шлифовальную шкурку, свойства которой все время оставались постоянными. Результаты приведены на рис.7.2; за относительную износостойкость E принято отношение износостойкостей испытуемого материала и эталона.

Установлено, что относительная износостойкость чистых металлов находится в линейной зависимости от микротвердости. Опытные точки располагаются на прямой, проходя-

щей через начало координат. Испытания баббитов на оловянной, свинцовой и оловянно-свинцовой основах и свинцовистой бронзы с различной микротвердостью разных структурных элементов не установили определенной зависимости между износостойкостью и микротвердостью. Тем не менее, во всех случаях износостойкость сплавов оказалась меньше, чем чистых металлов той же твердости. Для сталей в термически необработанном состоянии зависимость износостойкости от твердости такая же, как и для чистых металлов, Износостойкость сталей после их закалки и отпуска возрастает с увеличением твердости по линейному закону, но менее интенсивно, чем у чистых металлов и термически необработанных сталей. Испытания показали, что предварительный наклеп не повышает износостойкость чистых металлов и сталей.

Выводы по влиянию твердости абразива на износ металлов таковы: если твердость абразивных зерен значительно превышает твердость металла, то износ не зависит от разности твердостей абразива и металла; если твердость абразивных зерен ниже, чем твердость металла, то износ зависит от разницы твердостей и быстро уменьшается с увеличением этой разницы.

По данным М.М. Тененбаума, при твердости металлической поверхности, превышающей 60% твердости абразива, износостойкость резко возрастает. Такое отношение твердостей можно назвать критическим [16].

До сих пор предполагалось безударное взаимодействие абразивной частицы с поверхностью, фактор скорости вообще не учитывался. При большой относительной скорости рабочей поверхности и абразива длительность взаимодействия с абразивной частицей мала, и выделившаяся теплота вследствие пластического деформирования не успевает распространиться в глубь материала. Местный высокий нагрев изменит механические свойства материала, что повлечет изменение интенсивности изнашивания.

Не исключаются также структурные превращения. Удары абразивных частиц о выступающие зерна металлической поверхности расшатывают их связи с основой и способствуют разрушению.

Некоторые элементы конструкции работают при повышенной температуре, при которой возможно понижение механических свойств материала. В таких случаях можно ожидать усиления абразивного действия частиц [18].

Агрессивная среда, вызывая электрохимические процессы на поверхности детали, интенсифицирует изнашивание, превращая его в коррозионно-механическое.

Механизм абразивного изнашивания полимерных материалов определяется степенью их эластичности. В высокоэластичный материал—резину, вулкаллан, полиуретановый вулканизат и другие абразивные частицы легко вдаливаются, не вызывая пластической деформации даже при глубоком внедрении. Абразивное зерно, перемещаясь по поверхности, прилагает к ней силы трения. Не касаясь сложной картины напряженного состояния в материале, нетрудно представить себе, что силы трения впереди зерна вызовут сжатие, а сзади него — растяжение. Под действи-

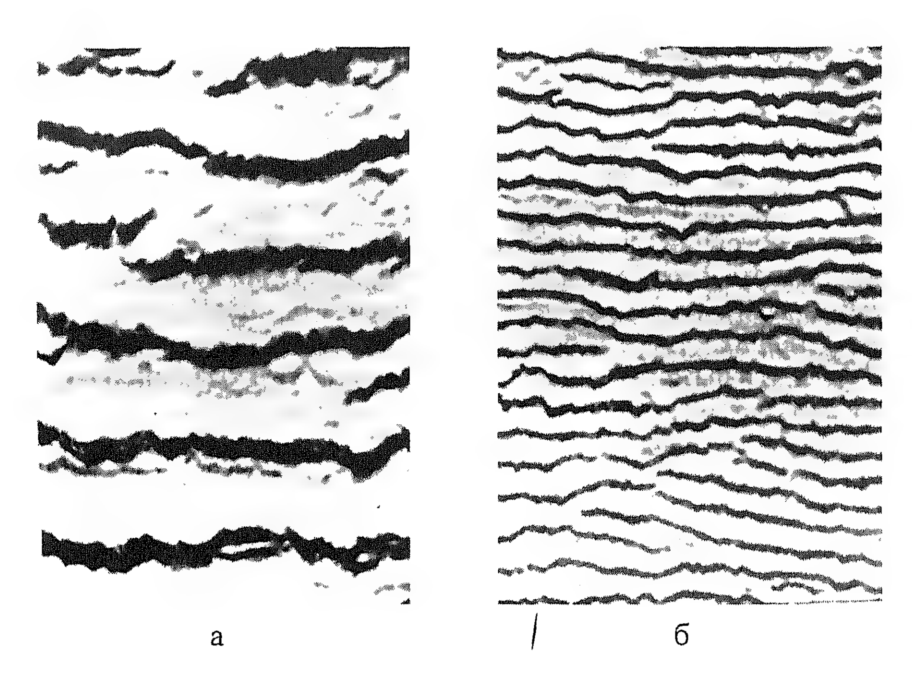


Рис. 7.3. **Поверхность резины после испытания на абразивное изнашивание по бетонным дорогам с грубой (а) и гладкой (б) поверхностями**

ем многократных растягивающих напряжений происходят микроразрывы, часть материала с поверхности уносится с образованием волнообразного рельефа из выступов и впадин в направлении, перпендикулярном движению абразива (рис. 7.3) [22]. Такая текстура наблюдалась рядом исследователей, например Ш.М. Биликом [2].

В дальнейшем под влиянием переменных растягивающих напряжений срабатываются первичные выступы неровностей, но волновой рельеф поверхности сохраняется.

Если в высокоэластичных полимерах изнашивание по своей природе является фрикционным (повреждение обусловлено силами трения), то изнашивание более жестких и хрупких полимеров происходит в основном в результате микрорезания. На интенсивность изнашивания сильно влияет структура материала. При трении с граничной смазкой преобладание кристаллических областей в полимере над аморфными обеспечивает более высокую его твердость и износостойкость. Между тем увеличение степени кристаллизации ухудшает стойкость при абразивном изнашивании. Дело в том, что даже при повышении твердости за счет увеличения кристаллических областей она остается в несколько раз ниже твердости абразива, поэтому фактор повышения твердости оказывается неэффективным. Уменьшение эластичности полимера, по мнению А.М. Когана и Д.Я. Соболева, создает более благоприятные условия для начала срезания абразивными частицами микрообъемов материала, при срезе отделяются бóльшие объемы, чем при фрикционной природе разрушения поверхности [12].

Сопротивление срезу недостаточно для характеристики стойкости полимера абразивному изнашиванию. Полиметилметакрилат, более прочный на срез в сравнении с капроном и полиамидом П-68, оказывается менее износостойким. Помимо сопротивления срезу износостойкость полимера определяется вероятностью начала среза вдавившимся в поверхность абразивом. Эта вероятность уменьшается с повышением эластичности и численно характеризуется показателями упругости материала.

М.А. Коган и Д.Я. Соболев при исследовании изнашивания пластмасс незакрепленным абразивом крупностью 0,075...1,6 мм на упругой подкладке установили:

1. Абразивные частицы размером 0,075 мм практически не вызывают износа. Относительно эластичные полимеры, такие, как полиамиды, мало изнашиваются при размере зерна 0,015 мм. При увеличении размера абразивных частиц более 0,1 мм интенсивность изнашивания всех полимеров уменьшается.

2. При трении пластмасс по шлифовальной шкурке, когда износ оказался прямо пропорциональным давлению, прямая пропорциональность сохраняется только до определенного предела; в дальнейшем интенсивность изнашивания с ростом давления не увеличивается.

3. Увеличение скорости скольжения до 0,5 м/с не влияет на интенсивность изнашивания. С увеличением скорости интенсивность изнашивания падает, а затем возрастает, по-видимому, вследствие большого тепловыделения.

2.1. Абразивное изнашивание при ударе

Процесс разрушения детали при ударном взаимодействии между деталью и абразивом называют ударно-абразивным изнашиванием. Этому разрушению подвергаются детали буровых долот, камне-и рудомелющих агрегатов, породоразрушающий инструмент пневмо- и гидроударников, детали гусеничного хода машин и др. Ударно-абразивное изнашивание поверхности происходит о монолитный или свободный абразив.

На ударно-абразивное изнашивание влияет природа и геометрическая форма, твердость, хрупкость абразивных частиц, толщина слоя абразива, энергия удара, твердость испытуемого материала и подложки, наличие жидкости в зоне удара и др. [7].

При абразивном изнашивании без ударного взаимодействия поверхности трения покрываются царапинами, расположенными в направлении движения абразива. Для ударно-абразивного изнашивания характерно образование на поверхности трения лунок в результате локальной пластической деформации металла. Края лунок образуют те выступы, которые внедряются в сопряженную поверхность и имеют твердость, превышающую твердость металла, или имеют наиболее благоприятное расположение своих граней к поверхности детали. Края лунок с меньшей твердостью обычно разрушаются, не повреждая поверхность детали. При

многократном взаимодействии абразива с поверхностью детали лунки расширяются и углубляются. В результате поверхность наклепывается, и происходит отрыв от нее частиц. Обычно это происходит у пластичных материалов. Для изнашивания твердых материалов характерно хрупкое выкрашивание.

При ударно-абразивном изнашивании износостойкость углеродистых сталей зависит не только от твердости, но и от состава и структуры стали. Максимальной износостойкостью обладают сталь, содержащая 0,7% углерода. Стали с большим содержанием углерода в результате хрупкого выкрашивания имеют меньшую износостойкость. При содержании углерода менее 0,7% стали подвергаются пластической деформации и больше изнашиваются. Чем сильнее ударное взаимодействие, тем больше сказывается содержание углерода на износостойкость стали [6].

3. Изнашивание от абразивных частиц в зазоре пары трения

Попавшие в зазоры пар трения абразивные частицы участвуют в восприятии приложенной нагрузки и могут в зависимости от условий впрессовываться в поверхности трения, раздавливаться на более мелкие фракции, скользить или перекатываться вдоль поверхности изнашивания, упруго и пластически деформируя ее.

Абразивные частицы могут попасть в рабочие полости машин и на поверхности трения из воздуха вместе с горючим и смазочными материалами и другими путями.

Из абразивных частиц, попадающих из воздуха, наибольшее изнашивающее воздействие оказывают частицы кварца, твердость которых достигает 11...12 ГПа. Эти частицы размером 1...30 мкм могут длительно находиться в воздухе при его движении (в результате ветра или движения транспорта).

Воздушные фильтры двигателей автомобилей и других машин могут задерживать только крупные частицы пыли; мелкие частицы проникают в двигатель вместе с засасываемым в цилиндры воздухом. Очищающая способность фильтров 98...99%, т.е. 1...2% пыли, содержащейся в воздухе, попадает в цилиндры двигателя. При часто встречающейся при эксплуатации автомобилей и тракторов запыленности воздуха 0,5...1 г/м^3 (данные Н.Ф. Почтарева) с каждым кубометром воздуха засасывается в цилиндры 5...20 мг пыли. Значительная часть поступивших абразивных частиц удаляется вместе с отработавшими газами; остальная часть, осаждаясь на стенки цилиндра, участвует в его изнашивании, незначительно изменяясь по размерам, проникает далее в картер и, распространяясь по всей смазочной системе, изнашивает детали других пар трения, особенно шейки коленчатого вала. Наибольшему абразивному изнашиванию подвергаются цилиндры и поршневые кольца. Интенсивность изнашивания деталей двигателя при загрязненном воздухе в несколько раз выше, чем при чистом воздухе. Так, двигатель автомобиля, эксплуатирующегося в песчаных районах, требует капитального ремонта после пробега в

15 тыс. км, тогда как в условиях незапыленного воздуха он проходит без ремонта 150 тыс. км и более [15].

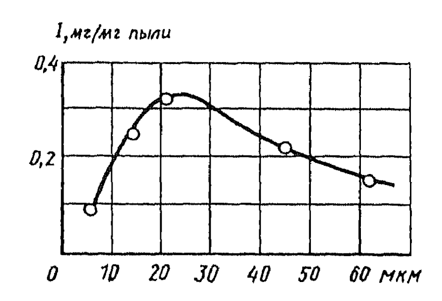


Рис.7.4. **Зависимость износа газоуплотнительного кольца двигателя от размера абразивных частиц дорожной пыли; нагрузка 45 л.с., частота вращения 2500 об/мин**

Результаты исследования влияния размера абразивных частиц на износ верхнего газоуплотнительного кольца, выполненного С.Е. Уотсоном, Ф.Н. Хенли и Р.У. Бурчеллем, показаны на рис. 7.4. Если проинтерполировать кривую в левую сторону, то она отсечет на оси абсцисс отрезок, соответствующий примерно размеру частиц в 2 мкм. Это означает, что при таком размере абразивные частицы не будут изнашивать сопряженные детали. При этом предполагается, что размеры твердых частиц не превосходят толщину граничной масляной пленки.

Абразивное изнашивание наблюдается в стационарных и в судовых двигателях внутреннего сгорания, причем в последних засасываемый воздух отличается высокой чистотой. Здесь абразивное изнашивание обусловлено как продуктами износа, так и, не в меньшей мере, нагаром. Нагар в двигателях внутреннего сгорания — это отложения на поверхности камеры сгорания, состоящие в основном из карбенов и карбойдов.

Рассмотрим вкратце ход нагарообразования. В центральной части камеры сгорания вследствие малой продолжительности процесса горения и недостатка кислорода имеются условия для образования продуктов неполного сгорания. Смазочное масло, проникающее в камеру сгорания, смешивается с продуктами неполного сгорания и под влиянием высокой температуры сначала превращается в смолистые вещества, а затем в лак, пленка которого покрывает горячие поверхности. Начинается нагарообразование. Следующая порция масла попадает на слой нагара, температура поверхности которого выше температуры поверхности металла. В дальнейшем масло попадает на поверхности, имеющие все более высокую температуру, условия для сгорания масла становятся благоприятнее, чем для смолообразования, поэтому образуется все меньше смолистых веществ, связывающих продукты сгорания с поверхностью. Слой нагара при данном температурном режиме цилиндра достигает определенной предельной толщины, наступает равновесная фаза: продукты неполного сгорания, не имея возможности оставаться на поверхности камеры сгорания, частично уходят с отработавшими газами, а частично проникают в масло.

Поверхностный слой нагара в равновесной фазе состоит из прокаленных частиц, слабо связанных друг с другом. Поэтому частицы отрываются от слоя, а взамен их появляются новые, восстанавливающие слой нагара до прежнего уровня. Отрывающиеся частицы уносятся в выпускной тракт, некоторая доля их попадает при нисходящем ходе поршня на открытую поверхность зеркала цилиндра и прилипает к имеющей-

ся на ней масляной пленке. При восходящем ходе поршня частицы попадают между цилиндром и поршневыми кольцами, производя абразивное разрушение поверхностей. Нагар попадает в кольцевую зону поршня, смешивается с лаковыми отложениями масла и далее с маслом проникает в картер. Абразивному изнашиванию продуктами нагара сильнее всего подвергается верхнее поршневое кольцо.

Образование продуктов износа, не обусловленное непосредственно абразивным изнашиванием, обязано пластическому деформированию поверхностей, избирательному изнашиванию отдельных составляющих и другим обстоятельствам. Абразивное изнашивание может происходить весьма интенсивно и на достаточно смазанных поверхностях, когда приложенная нагрузка передается от одной детали к другой не только через слой смазочного материала, но и через абразивные частицы. Влияние продуктов износа, состоящих из наклепанных, иногда отпущенных и окисленных частиц, зависит от интенсивности изнашивания. При малой интенсивности изнашивания частицы размером около 0,01 мкм, присутствуя в зазоре, не могут сколько-нибудь существенно влиять на силу трения. С увеличением интенсивности изнашивания размер частиц обычно растет, и доля их участия в процессе изнашивания возрастает. Это часто приводит к тому, что начавшееся по какой-либо причине интенсивное изнашивание прогрессивно нарастает до заметного повреждения поверхностей.

Даже такие, казалось бы, хорошо защищенные детали, как прецизионные пары топливной аппаратуры дизелей, изнашиваются от случайного воздействия абразивных частиц, попадающих вместе с топливом. Результатом изнашивания является разрушение кромок впускных окон и торцов плунжера, а также образование продольных рисок на плунжере и стенках насоса. Износ насосов-форсунок или насосов высокого давления нарушает дозировку подачи топлива, вызывает его подтекание и ухудшает качество распыления.

Ниже приведены некоторые данные, относящиеся к абразивному изнашиванию подшипниковых материалов. При попадании абразивных частиц в подшипники с мягким антифрикционным слоем они впрессовываются в этот слой (шаржируют его) и ускоряют износ сопряженного вала. Способность подшипникового материала работать при смазочном материале, загрязненном абразивом, является важной его характеристикой. При толстом слое баббитовой заливки попадание абразивных частиц в подшипник не вызывает серьезных отклонений от нормальной работы. Однако из-за недостатков, присущих баббиту, в особенности при большой толщине слоя, применяют такие подшипниковые материалы, как свинцовистая бронза, серебро и др. Вследствие повышенной твердости эти материалы при смазочном материале, содержащем абразив, работают хуже, чем баббит.

Исследования А.Е. Ройха работоспособности подшипниковых материалов при смазочном материале, содержащем абразивные частицы, показали, что при попадании последних в подшипники происходит резкое повышение температуры (рис. 7.5). Для каждого подшипникового мате-

риала имеется критическая концентрация абразива, при которой подшипники выходят из строя. Износ цапфы также находится в линейной зависимости от концентрации абразива. Для абразивных частиц большего размера, чем номинальная толщина масляного слоя, повышение температуры режима подшипника пропорционально размеру частиц.

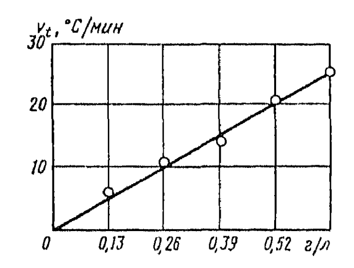


Рис. 7.5. **Зависимость скорости повышения температуры Vt подшипника скольжения от концентрации абразива**

При увеличении толщины заливки подшипника скорость повышения температуры при попадании абразива резко возрастает, и при дальнейшем возрастании толщины слоя кривая скорости нагревания асимптотически приближается к прямой, имеющей малый угол наклона к оси абсцисс. Когда толщина заливки меньше, чем номинальный размер абразивных частиц, основной металл подшипника существенно влияет на работоспособность подшипника. Так, если основной металл — медь, то температура повышается более значительно, чем если основной металл — алюминий.

В некоторых случаях для улучшения работы твердых подшипниковых материалов, когда при эксплуатации неизбежно попадание в смазочный материал абразивных частиц, прибегают к изготовлению "сетчатых" подшипников с заполнением углублений "сетки", образованной из твердого материала, мягким антифрикционным металлом, например баббитом. Такое мероприятие значительно облегчает работу подшипника.

Испытания показали, что при попадании абразива в подшипник из чистой меди скорость нарастания температуры 1800°С/мин (получено путем интерполяции), а в "сетчатом" подшипнике только 36°С/мин. Таким образом, разные материалы, применяемые в подшипниках, обладают различной работоспособностью при смазочном материале, содержащем абразив. Медь, свинцовистая бронза и алюминий наименее работоспособны и наиболее чувствительны к попаданию в смазочный материал абразивных частиц. Мягкие покрытия на твердых подшипниковых материалах значительно увеличивают работоспособность подшипника при наличии абразива.

При эксплуатации двигателей в верхний слой материала подшипника неизбежно впрессовываются твердые частицы, которые оказывают влияние на его работу на протяжении всего ресурса. Возникает вопрос, насколько снижаются антифрикционные свойства бронзовых подшипников двигателей за период эксплуатации вследствие шаржирования их абразивными частицами и не может ли это привести к заеданию и выходу их из строя.

Исследования, проведенные нами на машинах трения по определению антифрикционных свойств подшипников поршневых авиационных двигателей, показали, что подшипники, бывшие в эксплуатации, обладают более высоким коэффициентом трения (на 20...30% выше), более дли-

тельным периодом приработки (на 30...40%) и меньшей нагрузкой до заедания (на 20...30%) по сравнению с новыми подшипниками.

Химический состав верхнего слоя свинцовистой бронзы вкладышей, выработавших на авиационном поршневом двигателе ресурс, отличается от химического состава новых вкладышей: в них содержалось до 2,47% железа и до 2,5% алюминия. По техническим условиям у новых вкладышей допускается не более 0,3% железа и 0,02% алюминия.

Абразивные частицы не оказывают существенного действия на резиновые подшипники. Податливость резины не позволяет попадающей в зазор абразивной частице создавать высокое давление, при котором происходит шлифование поверхности стального вала; она может только полировать его. Для быстрейшего удаления абразивных частиц с поверхности подшипника на нем делают желобки или осевые канавки. При определенных условиях абразивные частицы скатываются в желобки и удаляются из подшипника. Абразивостойкость резиновых подшипников уменьшается при заключении резинового слоя в жесткую обойму. Резиновые подшипники могут работать только при смазывании водой; при достаточной прокачке ее такие подшипники могут выдерживать очень большие окружные скорости (20 м/с и выше). Коэффициент трения резиновых подшипников практически не зависит от нагрузки; с увеличением частоты вращения вала коэффициент трения подшипника снижается.

Подобно резине в абразивной среде ведет себя поликапролактам, который может работать как на воде, так и на обычных маслах. Изучение под микроскопом поверхностных слоев капролактамовых втулок, работавших в загрязненной абразивом среде, показывает, что абразивные частицы и продукты износа металлической контрдетали шаржируют мягкую поверхность поликапролактама, проникая в тело. В итоге образуется подобие твердой корки, связанной полимером, и появляются расположенные на различной глубине механические включения. Приводятся две причины проникновения их вглубь: возможный разогрев отдельных частиц в зоне общего контакта с деталями до температуры плавления полимера и течение полимера в отдельных местах поверхности и наволакивание его поверх частицы.

В результате проведенных С.Г. Екименковым лабораторных и стендовых сравнительных испытаний при абразивном изнашивании чугунных (СЧ 18) и капролактамовых образцов и втулок в паре с незакаленной поверхностью цапфы из стали 45 при скоростях скольжения 0,07... 0,28 м/с и содержании абразива (кварца) в смазочном масле до 15% и на основании полевых испытаний подшипниковых узлов почвообрабатывающих машин (тракторных плугов и навесных культиваторов) было установлено следующее.

1. Износ пластмассовых пар меньше, чем пары сталь—чугун, в 2... 4 раза в полевых условиях и в 5...7 раз в лабораторных условиях.

2. Интенсивность изнашивания сопряженных деталей возрастает с увеличением концентрации абразива в масле и повышением давления. При содержании абразива в масле свыше 15 % интенсивность изнашивания несколько замедляется. Интенсивность изнашивания деталей пар с

капролактамовыми втулками возрастает равномерно при увеличении давления до 3,9 МПа; интенсивность изнашивания пар с чугунными втулками возрастает более резко, в особенности при давлении 3,9 МПа, когда абразивное изнашивание сопровождается глубинным вырыванием вследствие схватывания.

3. Так как при смазывании чистым маслом интенсивность изнашивания пары стальная цапфа — капроновая втулка весьма мала, то небольшая добавка (2,5%) абразива к маслу вызывает резкое повышение интенсивности изнашивания, хотя она и остается меньше, чем в паре с чугунной втулкой.

Поскольку изнашивание цапфы производится в основном абразивом, шаржированным в поверхность полиамида, то, казалось бы, материал подшипника должен слабо влиять на изнашивание. На самом деле влияние это значительное, хотя и косвенное; большая податливость полиамида снижает пики местных контактных давлений. Более твердые фенопласты (ДСП, текстолит и др.) неудовлетворительно работают в условиях абразивного изнашивания.

Касаясь некоторых других деталей и узлов, отметим, что усиленное изнашивание зубьев колес конических передач тракторов и подшипников и их валов является результатом попадания абразивных частиц в картер из-за недостаточной герметичности трансмиссии. По данным И.И. Трепенкова, при эксплуатации гусеничных тракторов на почвах, содержащих свыше 70% песка, гусеница изнашивается через 800 ч при гарантийном сроке ее службы 2000 ч [19].

В зацеплении зубчатых колес происходит качение со скольжением. Опытами при подобных условиях на роликах установлено, что износостойкость при абразивном изнашивании прямо пропорциональна среднеквадратичной величине твердостей трущихся поверхностей при неизменном химическом составе каждой из них. Этот вывод может быть распространен на колеса открытых зубчатых передач.

Преждевременный выход из строя шарико- и роликоподшипников самолетов, сельскохозяйственных, дорожно-строительных, горных и других машин часто бывает связан с проникновением в подшипник абразивных частиц вследствие неудовлетворительного уплотнения корпусов. Эти частицы вызывают износ дорожек качения, тел качения и сепараторов. Об удельном весе этого вида повреждения можно судить по тому факту, что в результате абразивного износа в год выходят из строя 1,5...2 млн. подшипников вагонеток для угольных шахт.

При большом скоплении абразива может произойти настолько сильное заклинивание подшипника, что из-за проворачивания колец относительно посадочных поверхностей будут изнашиваться не только кольца, но и вал, и корпус.

При запыленности окружающего пространства и сложности выполнения надежных уплотнительных устройств одной из самых простых мер предохранения тихоходных трущихся узлов от воздействия пыли является смазывание их пластичным смазочным материалом.

Ряд конструктивных и технологических методов борьбы с абразивным износом изложен в работе [17, 18]. Сведения о расчетных методах оценки абразивного износа можно найти в работе [9].

4. Изнашивание от абразивных частиц в потоке жидкости или газа

При допущении, что среда неагрессивна к поверхности детали, следует различать два случая взаимодействия абразива с материалом.

1. Удар прямой, угол атаки $\alpha = 90°$. В зависимости от массы частиц, скорости их падения, свойств абразива и физико-механических свойств материала детали возникает упругая деформация, пластическая деформация, хрупкое разрушение, перенаклеп с отделением материала в виде чешуек. По данным К. Велингера и Г. Веца, наибольшей износостойкостью при твердости абразивных частиц, равной и выше твердости кварца, и скорости потока около 100 м/с обладает резина и спеченные материалы; весьма малой износостойкостью — базальт и стекло. Износостойкость углеродистых и инструментальных сталей примерно одного и того же порядка [23].

2. Косой удар, $0 < \alpha < 90°$. При углах атаки не выше угла трения на характер повреждения поверхности сильно влияет касательная составляющая импульса и сопротивление материала воздействию касательных сил на поверхность. У резины, по данным В. Н. Кащеева, скорость изнашивания уменьшается при увеличении угла атаки до угла трения, а затем становится постоянной; у других материалов, в зависимости от соотношения твердостей абразива и изнашиваемой поверхности, скорость изнашивания может непрерывно возрастать или достигать максимума при некотором угле атаки, а затем убывать[10].

В одних случаях износостойкость резины в несколько раз выше, чем закаленной стали, в других случаях (при нулевом угле атаки) износостойкость резины ниже, чем стали, в связи с фрикционной природой усталостного повреждения поверхности.

5. Влияние влажности и агрессивности среды на абразивное изнашивание

Влажность увеличивает интенсивность абразивного изнашивания, так же как и агрессивность среды. Л.А. Юксти и И.Р. Клейс провели несколько серий лабораторных исследований в целях определения количественных зависимостей влияния влажности абразива, агрессивности среды, угла атаки и скорости потока на интенсивность изнашивания торфоперерабатывающего оборудования при нормальной температуре [11]. Исследования проводили на центробежном ускорителе. Применяли песок, увлажненный водой, торфяными вытяжками или слабыми растворами органических кислот. Влажность песка варьировалась в пределах 0...16%, ско-

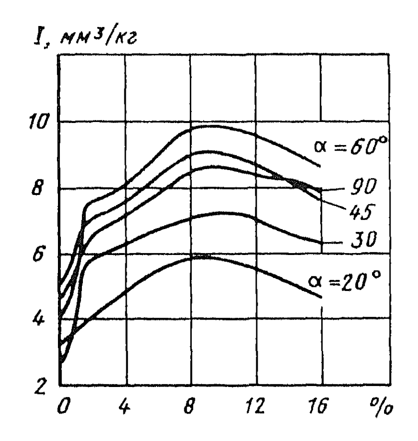


Рис. 7.6. **Зависимость интенсивности изнашивания образцов из стали Ст3 от содержания влаги в абразиве (%) и угла атаки абразива (скорость потока v = 29 м/с)**

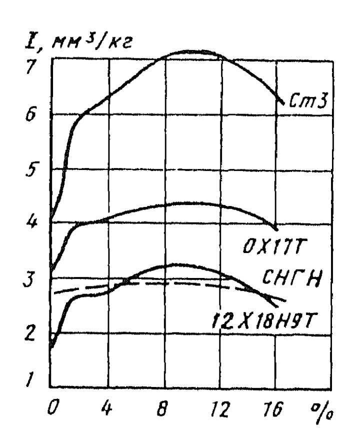


Рис. 7.7. **Кривые изнашивания различных материалов в потоке влажного абразива (v = 29 м/с, α = 30°)**

рость удара абразивных частиц о поверхность образцов 29...82 м/с. Наряду со сталью Ст3, принятой за эталон, испытывали стали 08Х17Т, 12Х18Н9Т, а также 20Х13, 45Х14Н14В2М и наплавочное износостойкое покрытие СНГН на никелевой основе. По данньм Ю.А. Оградинского, Т.И. Подойницына и Е.И. Январева, этот сплав обладает высокой стойкостью в условиях эрозионного и сильного абразивного воздействия и высоких температур.

Результаты, полученные Л.А. Юксти и И.Р. Клейсом при испытании на изнашивание образцов из стали Ст3 в зависимости от влажности абразива и угла атаки, приведены на рис. 7.6. Уже при содержании в абразиве влаги (водопроводная вода) 1% интенсивность изнашивания возрастает в 1,2...2,7 раза в зависимости от угла атаки.

Скачкообразное увеличение интенсивности изнашивания при малых добавках воды наблюдается и у коррозионно-стойких сталей (рис. 7.7). Интенсивность изнашивания сплава СНГН мало зависит от влажности абразива.

При исследовании влияния агрессивности среды на абразивное изнашивание применяли воду, вытяжки из торфа, а также слабые растворы уксусной и щавелевой кислот. Результаты испытаний приведены в табл. 7.1 (абразив — песок, влажность v = 8 %, v = = 20 м/с, α = 30°, T = 20°С).

Испытания в промышленных условиях показали преимущество износостойких покрытий. После 8,5 мес. работы в наиболее изнашиваемых местах торфяного тракта износ образцов с наплавкой СНГН оказался в 5,1...9,5 раза, стали 08Х17Т в 3,1...3,4 раза, а стали 12Х18Н9Т в 3,4... 4 раза меньше износа стали Ст3. Между результатами опытов на коррозию при статическом воздействии жидкой среды и на износ в потоке абразива, увлажненного этой средой, корреляционной зависимости не установлено.

Таблица 7.1

Среда	Скорость изнашивания материалов образцов, мм³/ч					
	Стали				ВТ1-0	СНГН
	Ст3	08Х17Т	20Х13	12Х18Н9Т		
Вода	4,6	3,4	2,9	2,1	4,0	2,6
Уксусная кислота:						
1 %	4,9	3,6	3,3	2,3	4,1	3,1
2%	5,0	3,6	3,5	2,5	4,4	3,5
3%	5,3	3,7	3,6	2,7	4,5	3.1
Щавелевая кислота:						
0,17 Н	4,9	3,8	4,1	2,5	4.3	2,6
0,34 Н	5,0	S.9	4,3	2,9	4,6	2,2
Торфяная вытяжка	4,9	3,3	3,2	2,5	4,4	2,4
Уксусная кислота 2%*	6,2	3,8	3,5	2,6	4.3	3,2
Сухой песок	3,7	3,1	3,0	2,1	3,8	2,5

* Опыт с перерывами по 15 мин.

Результаты исследований (см. табл. 7.1) по влиянию 15-минутных перерывов на абразивное изнашивание материалов свидетельствуют, что по сравнению с беспрерывным потоком износ стали Ст3 увеличился на 24%, стали 08Х17Т на 2...3%, в то время как износ стали 12Х18Н9Т, сплава СНГН и технического титана ВТ1-0 остался на прежнем уровне. Объяснение полученных результатов, имеющих большое практическое значение, по нашему мнению, следует искать в процессе наводороживания поверхностей трения, происходящем при абразивном изнашивании [8].

Г. Хейнике и Н. Харенц [20] отмечают, что при динамическом воздействии твердых частиц на поверхность металла и наличии воды может проходить реакция $Me + H_2O \rightarrow MeO + H_2$. Исследования проводили в вибростакане, где металл в виде пластинок подвергался трибомеханическим повреждениям твердым материалом (карбидом кремния или корундом) в атмосфере газа с помощью колебательных движений. Результаты испытаний различных материалов и сплавов, проведенных в атмосфере насыщенного водяного пара при 30°С, следующие:

Металл	Образование водорода, моль
Золото	0
Кадмий	2
Кадмий + платина	50
Хром	5
Медь	10
Олово	4
Олово + платина	12

Исследования показывают, что вода действует как окислитель и может приводить к коррозии. Она может оказать разрушающее действие и привести к опасным повреждениям механически напряженных деталей машин.

6. Влияние мелких абразивных частиц на износ

Данный вопрос рассмотрен в технической литературе применительно к случаю, когда мелкие абразивные частицы находятся в масле или другой жидкости [5]. Экспериментально установлено, что если размер частиц не превышает 5 мкм, то они, имея большую развитую поверхность, адсорбируют на себе продукты окисления масла, что может снизить интенсивность изнашивания деталей. Кроме того, имеется мнение, что частицы способствуют перетеканию электрических зарядов с одной поверхности трения на другую, что может снизить электростатическую напряженность, а следовательно, и силу трения. Можно также предполагать, что частицы интенсифицируют теплопередачу между поверхностями трения. Частицы разделяют поверхности, в результате контакт поверхностей становится дискретным, а наиболее дисперсная часть этих частиц нивелирует поверхности. Если учесть, что высокодисперсные примеси снабжены адсорбционной оболочкой, то можно считать, что мелкие частицы выполняют функции противоизносной и антифрикционной присадок, препятствуя непосредственному контакту трущихся поверхностей. Однако все это относится только к частицам менее 5 мкм. Частицы больших размеров приносят вред. Опыты О.А. Никифорова на машине трения при частицах менее 5 мкм показали скорость изнашивания 0,3 мг/ч, а при частицах 10 мкм — 0,92 мг/ч.

Особую опасность частицы больших размеров представляют для гидросистем, где трущиеся детали из твердых сталей работают при малых зазорах. В гидросистемах всегда имеются фильтры тонкой очистки, однако, несмотря на это, в системах присутствуют частицы с размерами более 5 мкм. Фирма "Виккерс" (Великобритания) приводит для гидросистем следующее распределение по размерам частиц: 0...5 мкм — 39%, 5...10 мкм — 18%, 10...20 мкм — 16%, 20...40 мкм — 18%, 40... 80 мкм — 9%.

Наличие крупных частиц в системах с фильтрами тонкой очистки Г.В. Виноградов объясняет тем, что мелкие частицы способны коагулировать за счет свободных связей молекул пристенного слоя до величины 30...40 мкм.

Таким образом, многие исследования показывают, что частицы размером менее 5 мкм уменьшают износ и в процессе эксплуатации коагулируют. Частицы размером более 5 мкм увеличивают износ. Все это привело С.В. Венцеля и Е.С. Венцеля к выводу о необходимости в процессе работы гидрооборудования проводить диспергирование частиц — пропускать гидросмесь через диспергатор гидродинамического действия или ультразвуковой диспергатор.

Проведенное Е.С. Венцелем диспергирование механических частиц в масле гидрооборудования показало перспективность этого метода в части уменьшения износа деталей, увеличения срока службы масла, повышения КПД и надежности работы гидрооборудования.

М.Л. Барабаш и М.В. Корогодский для улучшения качества приработки, а в дальнейшем для повышения износостойкости автомобильных

двигателей искусственно вводили в масло высокодисперсные добавки — органозоли железа, которые, по их мнению, заполняли микровпадины, адсорбируясь на поверхностях трения и увеличивали площадь фактического контакта [1].

Кроме того, микроабразив усиливает физико-химические процессы в зоне трения. Вызывая незначительные деформации поверхностных слоев, микроабразив вызывает появление новых поверхностей, которые являются наиболее активными участками протекания химических реакций и диффузионных процессов.

Исследования Г.И. Бортника и Г.П. Шпенькова показали, что микроабразив размером 3 мкм и менее ускоряет протекание начальной фазы ИП — образование сервовитного слоя и тем самым ускоряет процесс приработки деталей. Наличие до 1,5% микроабразива размером 3 мкм в смазочном материале снижает коэффициент трения, ускоряет образование оптимального микрорельефа и равномерного слоя меди по всей площади касания [4].

Глава 8. ОКИСЛИТЕЛЬНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ, ИЗНАШИВАНИЕ ВСЛЕДСТВИЕ ДЕФОРМАЦИИ, ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И ВЫКРАШИВАНИЯ

1. Окислительное изнашивание

Окислительное изнашивание происходит в том случае, когда на соприкасающихся поверхностях образуются пленки окислов, которые в процессе трения разрушаются и вновь образуются; продукты износа состоят из окислов. От других видов коррозионно-механического изнашивания оно отличается отсутствием агрессивной среды, протекает при нормальных и повышенных температурах при трении без смазочного материала или при недостаточном его количестве. Интенсивность изнашивания может быть весьма значительной, но поверхности трения сохраняют малую шероховатость; это объясняется тем, что окислы препятствуют схватыванию поверхностей. При обычных температурах окисление поверхностей активизируется пластической деформацией. Поэтому одним из методов борьбы с окислительным изнашиванием является создание поверхностей трения с высокой твердостью.

Для окислительного изнашивания необходимо, чтобы промежуток времени между последовательными разрушениями пленки был достаточен для образования пленки относительно большой толщины. Естественно, что в случае циклического разрушения окислов высокой твердости изнашивание будет носить характер абразивного.

Окислительному изнашиванию подвергаются калибры, детали шарнирно-болтовых соединений тяг и рычагов механизмов управления; шарнирно-болтовые соединения подвесных устройств машин, работающих без смазочного материала; металлические колеса фрикционных передач и чашки вариаторов, а также некоторые детали в парах трения качения. Окислительное изнашивание калибров изучено А.Л. Честновым [4].

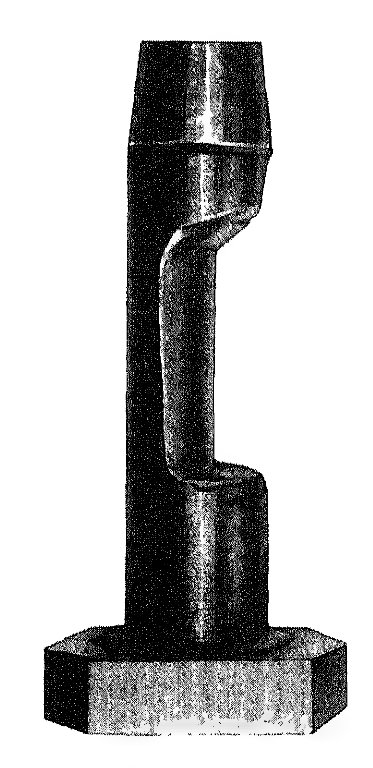


Рис. 8.1. **Болт крепления коллектора авиационного поршневого двигателя, поврежденный вследствие окислительного изнашивания**

Повышение температуры способствует росту окисных пленок, а вибрация — их разрушению [2]. С интенсивным окислительным изнашиванием в подоб-

ных условиях приходится встречаться, например, в деталях крепления выхлопных коллекторов авиационных двигателей внутреннего сгорания (рис. 8.1).

В ряде случаев интенсивность окислительного изнашивания можно уменьшить, сменив смазочный материал, понизив температуру узла. Казалось бы, что применение коррозионно-стойкой стали должно дать дополнительный эффект, однако аустенитные стали, не говоря о склонности их к схватыванию, быстро окисляются в процессе трения. Окислительное изнашивание изучено Б.И. Костецким и его учениками [1].

2. Изнашивание вследствие пластической деформации

Этот вид изнашивания (смятие) заключается в изменении размеров или формы детали в результате пластической деформации ее микрообъемов. Пластическое деформирование обычно сопровождает износ металлов и наблюдается в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности трения. Здесь же имеется в виду деформация, распространяющаяся на всю деталь или на значительные объемы ее. Смятие может произойти при трении, но может быть и не связано непосредственно со скольжением или качением поверхностей.

Смятие является характерным видом повреждения шпоночных пазов и шпонок, шлицевых соединений, штифтов и упоров, резьбовых соединений и других деталей. Пластическая деформация вызывается либо чрезмерными допускаемыми напряжениями, либо случайными значительными перегрузками. Во избежание смятия шпоночных пазов и среза шпонок, по опыту эксплуатации металлорежущих станков, для неподвижных соединений при стальной ступице рекомендуется выбирать допускаемые напряжения смятия 1,5 ГПа при знакопеременной нагрузке с толчками и 2 ГПа при постоянной нагрузке. При чугунной ступице допускаемые напряжения ниже на 60%.

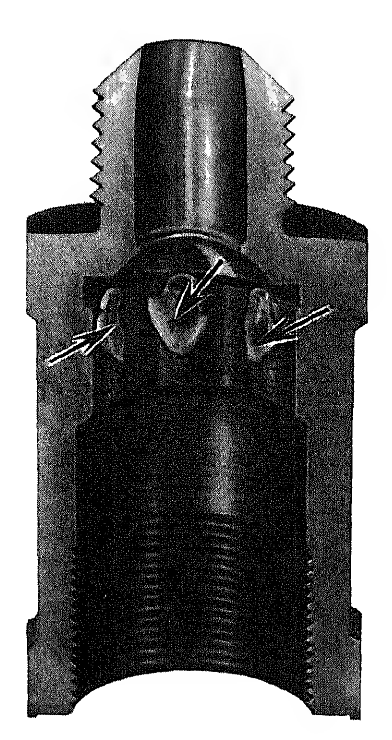


Рис. 8.2. **Разрез корпуса шарового крана, поврежденного пластической деформацией** (показано стрелкой)

Смятие характерно для деталей, входящих в контакт с ударом. К ним относятся, например, регулировочные болты коромысел приводов клапанов и седла шаровых клапанов (рис. 8.2).

В тихоходных зубчатых передачах с колесами из сталей невысокой твердости возникают значи-

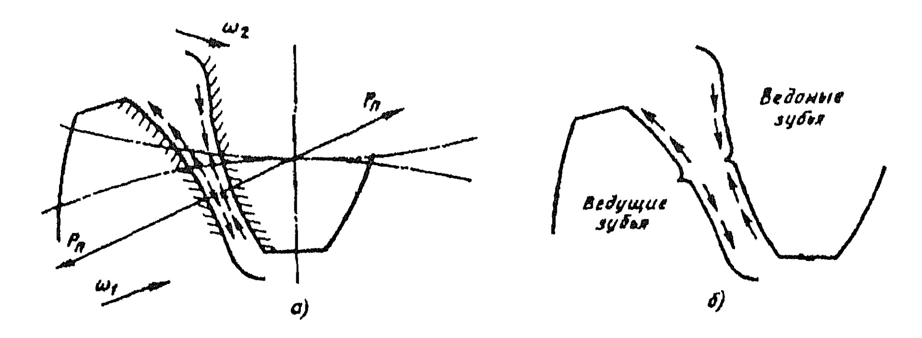


Рис. 8.3. **Силы трения на поверхности ведущих и ведомых зубьев (а) и схема образования впадины и хребта (б) ($P_п$—$P_п$ — линия зацепления)**

тельные пластические деформации с образованием канавок по полюсной линии у ведущих зубьев (рис. 8.3).

Под действием высоких контактных напряжений разрушается масляная пленка, и происходит течение поверхностных слоев металла в направлении скольжения. Впрочем, не исключается такое течение и при неповрежденной масляной пленке. Скольжение в полосе зацепления меняет свое направление, в результате меняется направление сил трения на поверхности ведущих зубьев: они направлены от полюса к вершине и впадине зуба, а от ведомых зубьев — к полюсу. Этим предопределяется форма повреждения. Поэтому при появлении "хребта" в передаче его необходимо время от времени срезать шабером. Повышением вязкости масла можно снизить силы трения и уменьшить интенсивность пластической деформации. Вообще же рекомендуется применять стали большей твердости.

В колесах конических и гипоидных передач пластическая деформация вязкого, а иногда твердого материала проявляется в результате ударного приложения нагрузки к зубьям одного или обоих сопряженных колес и имеет вид борозд, от которых металл течет через кромку зуба с образованием волнистого наплыва — заусенцев. На зубьях шестерен гипоидных передач и крайне редко на зубьях колес наблюдается пластическая деформация в виде ряби (рис. 8.4) как при вязком материале, так и при цементованной поверхности. Предполагают, что рябь типа "б" вызвана циклически изменяющейся нагрузкой на протяжении пребывания зуба в зацеплении. Существует мнение, что такая рябь способствует образованию устойчивой масляной пленки, вследствие чего увеличивается сопротивление изнашиванию при низких скоростях.

Из стальных деталей пластической деформации подвержены рельсы, колеса и бандажи подвижного состава железных дорог. При эксплуатации рельсов на железнодорожных путях вследствие прокатывающего (качение со скольжением) действия колес под нагрузкой, удара колес на стыках и неуравновешенных инерционных сил механизма локомотива пластическая деформация распространяется на глубину почти всей головки рельса и сопровождается отчетливо различным смятием верха и рабочих краев головки.

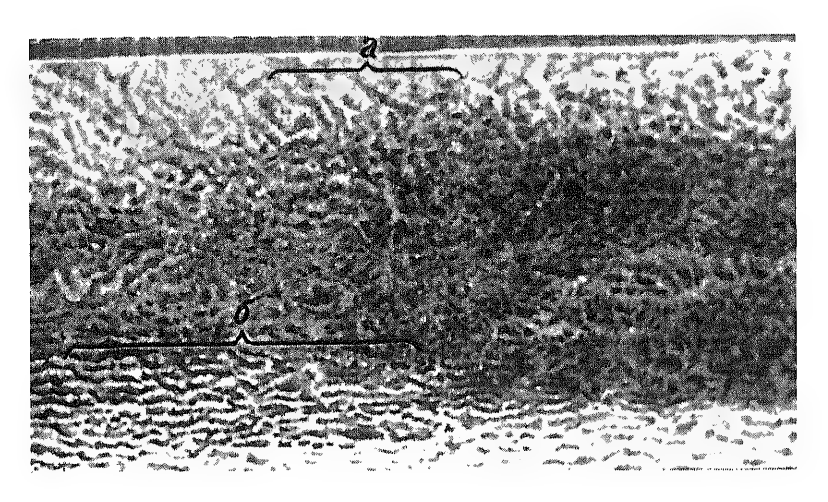


Рис. 8.4. **Рябь на поверхности зуба шестерни заднего моста автомобиля:**
а – фронт ряби наклонен к кромке зуба; *б* – фронт ряби параллелен кромке зуба

Особенности работы двигателя тепловоза — одна из причин значительного проскальзывания бандажей ведущих колес. Дополнительно к отмеченным выше факторам, вызывающим пластическую деформацию, можно отнести нагрев поверхностного слоя бандажа при торможении. На основании металлографического и рентгеноструктурного анализов в сочетании с определением твердости Т.В. Ларин установил, что изменение кристаллической решетки материала бандажа в процессе эксплуатации распространяется на глубину до 25 мм. Наибольший наклеп наблюдается непосредственно на поверхности качения, далее в глубину он резко падает, оставаясь довольно высоким на глубине 1...1,5 мм. Значительная пластическая деформация является, вероятно, одной из причин ослабления посадки бандажа на колесном центре. Если отсутствуют фазовые превращения в материале бандажа во время эксплуатации, то высокий наклеп разупрочняет, разрыхляет структуру, образуются микротрещины с отделением в дальнейшем частиц пластически деформированного материала.

Буксование колес, трение о тормозные колодки, удары на стыках рельсов и на стрелках при высокой нагрузке на колесо свойственны колесным парам (скатам) тепловозов и электровозов и служат причинами пластического деформирования бандажей (рис. 8.5), изготовленных обычно из среднеуглеродистой стали. Особенно интенсивно изнашивается гребень по внутреннему контуру и примыкающий к нему участок с уклоном 1 : 20; со стороны фаски имеется наплыв металла.

Образование вмятин и углублений на поверхностях трения один из видов повреждения подшипников качения. При сдавливании посторонних частиц, попавших между телами качения и кольцами, могут образоваться вмятины на дорожках качения. Ударная и весьма тяжелая нагрузка может вызвать местную деформацию кольца в контакте с шариками или

роликами — особый вид пластической деформации на дорожках качения, известный под названием бринеллирования.

В роликовых и шариковых опорных устройствах поворотных частей портальных и других кранов несущие кольца обычно большого диаметра выполняют из проката или литья. При недостаточной твердости материала кольца под действием нагрузки поверхность кольца может пластически деформироваться, а затем разрушиться (отслаивание вследствие перенаклепа); этому может сопутствовать контактная усталость.

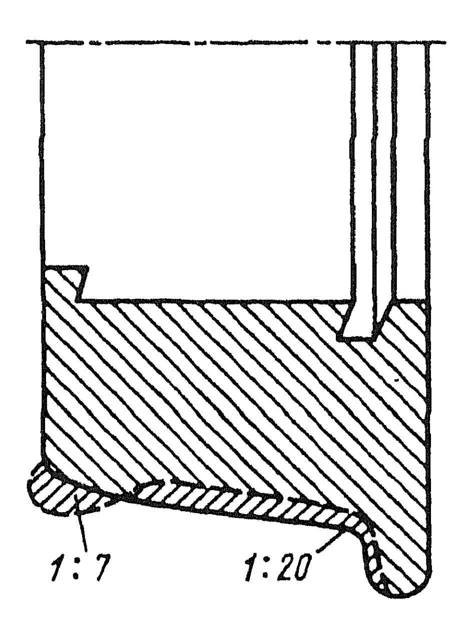


Рис. 8.5. Профиль бандажа колеса электровоза нового (сплошная линия) и изношенного(штриховая линия)

Постепенное развитие макродеформации под нагрузкой, чаще всего динамического характера, наблюдается у вкладышей и втулок, обычно изготовляемых из цветных металлов, и проявляется в смещении металла за пределы поверхности соприкосновения с неподвижной контрдеталью в осевом направлении. Это является причиной ослабления прессовой посадки и приводит к увеличению зазора в подвижном сопряжении. Иногда образование заусенца вследствие смятия происходит в радиальном направлении, что затрудняет демонтаж втулки. Если о наличии такой деформации неизвестно, то не исключается последующее повреждение корпусной детали. Для примера можно взять случай из практики эксплуатации шестеренного насоса высокого давления. Пластическая деформация установленных в корпусе насоса (из алюминиевого сплава) бронзовых подпятников выражается в образовании наплыва, внедренного в более мягкий материал корпуса (рис. 8.6).

Одним из видов повреждений подшипников скольжения является выдавливание баббитового слоя, которое связано с его низкой твердостью либо с чрезмерными нагрузками на подшипник, возникающими в числе других причин вследствие дефектов монтажа или из-за недостаточной жесткости узлов. Сопротивление смятию баббитового слоя повышается с уменьшением толщины.

В антифрикционном слое из мягких подшипниковых сплавов происходит иногда постепенное перемещение поверхностных слоев в направлении скольжения под действием сил трения, что приводит к изменению размеров подшипника, погрешностям формы рабочей поверхности, образованию трещин в баббитовом слое в местах расположения пазов для крепления баббита и заволакиванию смазочных канавок и отверстий. Эта

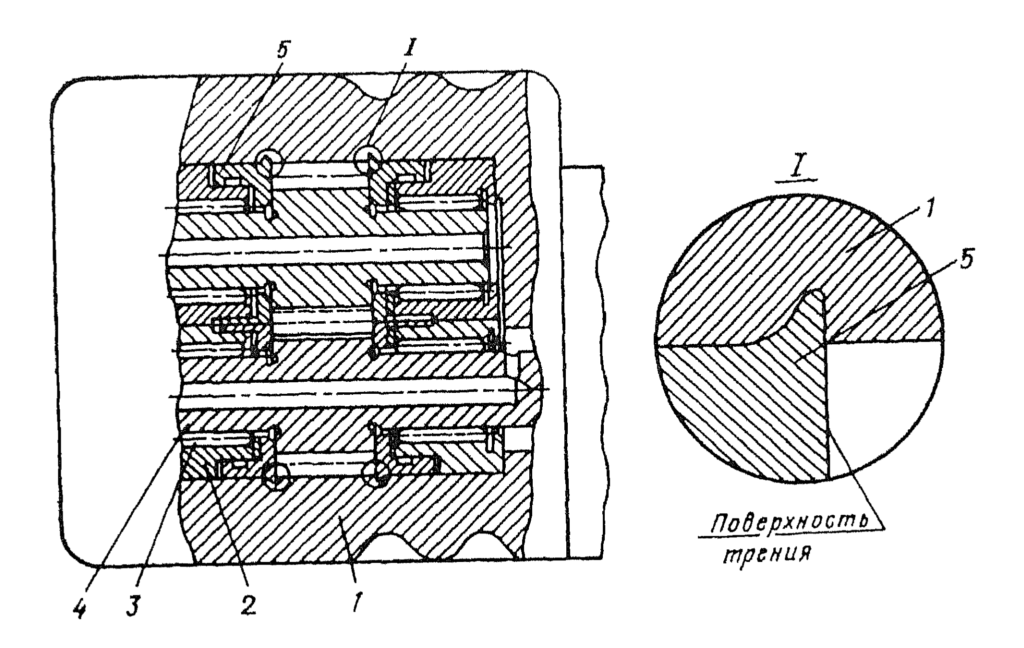


Рис. 8.6. **Схема микровнедрения бронзы в корпус гидронасоса:**
1 – корпус; *2* – стальная обойма; *3* – игла; *4* – шестерня; *5* – подпятник

деформация развивается только во время работы подшипника и, по-видимому, в значительной степени связана с динамическим силовым воздействием. Повышенные температуры и пластифицирующее действие смазочного материала облегчают условия пластического течения поверхностных слоев антифрикционного сплава.

Интенсивное течение материала под действием сил трения обнаруживается даже у чугуна. Так, у поршневых колес двигателей внутреннего сгорания после износа на глубину фаски образуется заусенец за пределами нижней опорной поверхности кольца. Разрушение заусенца несколько усиливает абразивное изнашивание цилиндров.

3. Изнашивание вследствие диспергирования

Многие детали трения не имеют на рабочих поверхностях следов схватывания и заметных царапин; они работают при достаточно хорошем смазывании и умеренных температурах. В тонких поверхностных слоях таких деталей не происходит каких-либо химических и структурных изменений. При этих условиях разрушение поверхностного слоя происходит в результате диспергирования (измельчения) отдельных участков контакта. Интенсивность этого вида изнашивания невысока, а шероховатость поверхности деталей малая.

Процесс изнашивания протекает так: на площадках фактического контакта материал подвергается многократной упругой и пластической деформации, что приводит к разупрочнению, разрыхлению в отдельных местах структуры материала с последующим отделением небольших блоков. Процесс разрыхления, вероятно, подобен процессу зарождения и развития усталостной трещины в детали под действием циклических нагрузок. Поверхностная пластическая деформация приводит также к охрупчиванию материала на отдельных микроучастках и его выкалыванию. Не исключаются повреждения, связанные с взаимным внедрением микроучастков поверхностей без разрушения масляной пленки.

Изнашиванию вследствие диспергирования подвергаются хорошо смазываемые шарнирно-болтовые соединения, валики различных агрегатов и сопряженные с ними подшипники, поршневые пальцы прицепных шатунов, пары трения топливной аппаратуры и др.

На рис. 8.7 приведен цементированный и закаленный поршневой палец, длительно работавший на двигателе. Износ его не выходит за пределы допуска, поверхность гладкая, без задиров, отсутствуют видимые следы переноса металла с сопряженной поверхности. По данным металлографического анализа пластически деформирован тонкий поверхностный слой. Под микроскопом заметны риски по направлению движения, как результат взаимного внедрения на участках контакта сопрягаемых поверхностей.

Болт шарнирного соединения (рис. 8.8) с оксидированной рабочей поверхностью работал по стальной втулке, смазочный материал ЦИАТИМ-201. Диспергировалось оксидное покрытие по всей поверхности, за исключением участков, обнаруживаемых на фотографии в виде темных полос. Эти полосы соответствуют масляным канавкам на бронзовой сопряженной втулке.

Диспергирование рабочих поверхностей может происходить также в случае жидкостной смазки при большой надежности. Так, поверхность шипа при вращении, переходя из ненагруженной зоны в нагруженную, испытывает переменное давление, влияющее на циклы изгибных напря-

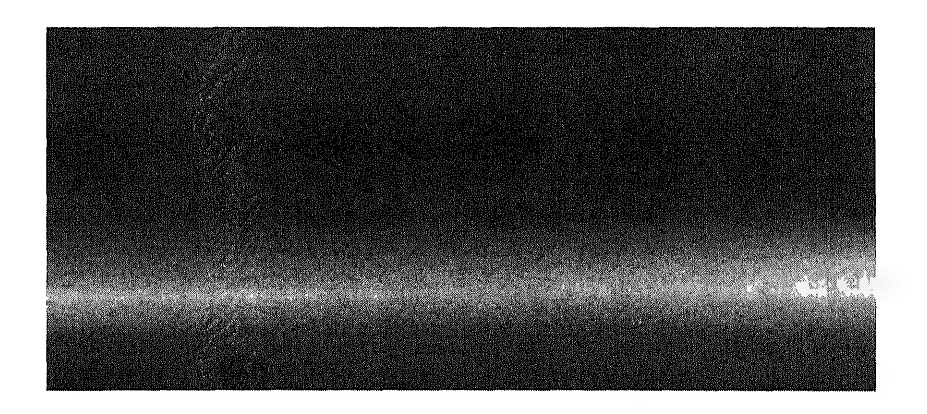


Рис. 8.7. **Поршневой палец двигателя внутреннего сгорания после длительной работы**

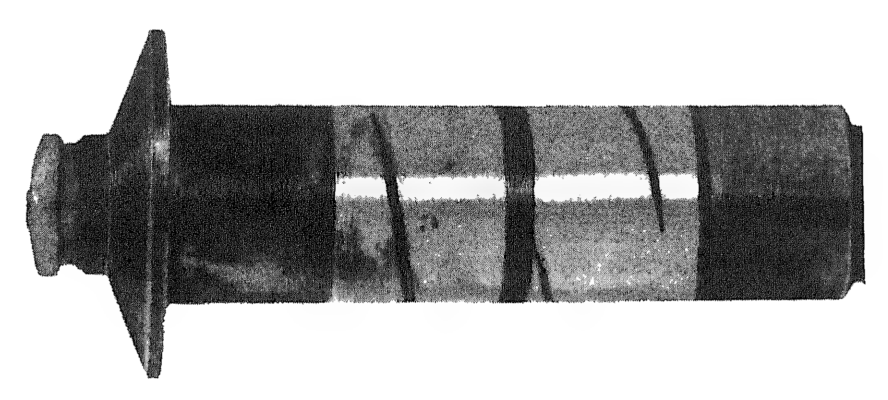


Рис. 8.8. **Болт шарнирного соединения шасси самолета**

жений. При высокой частоте вращения и относительно большой длительности работы, когда суммарное число циклов исчисляется десятками миллионов, легко допустить накопление субмикроскопических дефектов даже при весьма низких напряжениях, что в совокупности с адсорбционно-расклинивающим эффектом приводит к износу поверхности при малой интенсивности изнашивания.

4. Изнашивание в результате выкрашивания вновь образуемых структур

При тяжелых условиях работы на поверхностях трения происходят физико-химические изменения. Они являются результатом пластического деформирования, повышения температуры слоев металла, прилегающих к зоне контакта, последующего быстрого охлаждения и химического действия окружающей среды. Эти физико-химические изменения, заключающиеся в образовании новых структур, в свою очередь изменяют вид взаимодействия и характер разрушения поверхностей.

На поверхностях трения стальных и чугунных деталей иногда образуются блестящие белые пятна или полосы, полностью или почти не травящиеся обычными металлографическими реактивами. Эти образования, открытые В.П. Кравз-Тарнавским в 1928 г., получили наименование белого слоя. Твердость белых слоев того же порядка, что и материала детали, но бывает значительно выше твердости мартенсита среднеуглеродистой стали. Слой отличается высокой хрупкостью, структура слоя высокодисперсная. В зависимости от условий образования белые слои могут состоять из мартенсита, смеси аустенита и мартенсита, цементита и феррита и из других сочетаний структур. Может случиться, что на одной детали будут разные по структуре белые слои. Образование белого слоя обязано быстро протекающему термическому либо химико-термическому процессу.

Белому слою посвящены многочисленные исследования, например Б.Д. Грозина, А.Д. Курицыной, В.А. Кислика, Т.В. Ларина, В.П. Девяткина, К.В. Савицкого, Ю.И. Когана и др. [3].

Процесс возникновения и развития белого слоя на поверхностях трения представляется следующим. На отдельных участках фактического контакта происходит интенсивная пластическая деформация, сопровождающаяся значительным тепловыделением. Теплота, концентрируясь в поверхностных микрообъемах, создает большой температурный градиент по глубине, в результате скорости нагрева и охлаждения микрообъемов больше, чем при термической обработке. Повышение температуры в отдельные моменты выше критической точки приводит к образованию аустенита из феррито-цементитной смеси, а последующее резкое охлаждение — к появлению закалочных структур, которые в дальнейшем, подвергаясь пластической деформации и периодическому воздействию температурного фактора, переходят в белый слой. Аналогично описанному образуется белый слой при "пропахивании" поверхности трения абразивом.

В образовании белого слоя может активно участвовать воздух, смазочный материал, сопряженная деталь. Встречаются белые слои, содержащие азот и кислород, а также насыщенный углеродом аустенит и сложного состава карбиды. Очаги с повышенным содержанием углерода на поверхности образуются в результате диффузии его из более глубоких слоев материала или разложения смазочного масла.

Пластическая деформация стимулирует диффузионную активность металла, как в силу образования микро- и субмикродефектов (микротрещин, микропор и вакансий), так и в силу относительно значительных перемещений металла и обнажения ювенильных поверхностей.

Одновременно с образованием белого слоя возникает система внутренних напряжений, которая совместно с рабочими напряжениями приводит к растрескиванию слоя и выкрашиванию его отдельных частиц. Продукты износа, попадая в зазоры между сопряженными деталями, могут вызывать интенсивное, доходящее до катастрофического, изнашивание.

Белые слои образуются на рабочих поверхностях рельсов и бандажей колес локомотивов и вагонов, на зубьях шестерен, подшипниках качения, поршневых кольцах двигателей внутреннего сгорания, на лопатках быстроходных керосиновых насосов и их корпусах и других деталях (рис. 8.9, 8.10). Белые слои могут появиться в процессе заедания чугунных деталей или деталей, изготовленных из высокоуглеродистых сталей, а также при ударах. Белый слой обнаруживается при обработке сталей при скоростях резания 12...27 м/мин и несколько выше, при шлифовочных ожогах, наклепе, а также под воздействием горячих газовых струй. Иногда белый слой пятнами располагается на дне и стенках образовавшихся рисок на поверхности трения и может быть выявлен после травления поверхности кислотами. Белые слои искусственно создают при электроупрочнении для повышения износостойкости деталей и упрочнения инструмента.



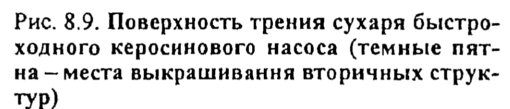


Рис. 8.9. **Поверхность трения сухаря быстроходного керосинового насоса (темные пятна – места выкрашивания вторичных структур)**

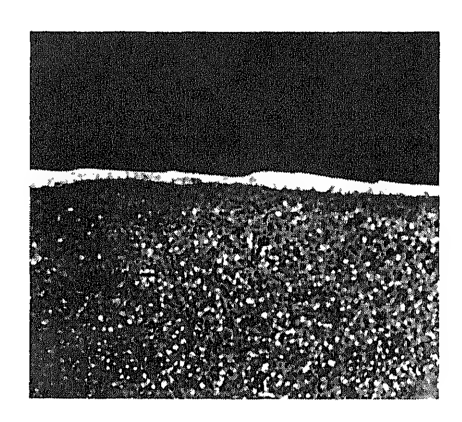


Рис. 8.10. **Сечение стального золотника с образовавшимся белым слоем на его поверхности в процессе заклинивания в стальной втулке**

Чем больше углерода содержится в стали, тем при прочих равных условиях больше образуется белого слоя. Недостаточная приработка поверхности трения или форсированный ее режим могут служить причиной образования белого слоя. Природа белого слоя и роль различных легирующих элементов и образуемых структур, например фосфидных эвтектик в чугуне, еще недостаточно изучены.

Образование и выкрашивание белого слоя в некоторых случаях является основным видом изнашивания бандажей железнодорожных колес. Высокие нагрузки в контакте, значительное теплообразование во время проскальзывания колеса по рельсу, дополнительный нагрев при торможении, быстрое охлаждение в результате теплоотвода во внутрь металла — факторы, способствующие образованию белой фазы. Низкие температуры в зимнее время могут влиять на глубину закаленного слоя и его твердость. Поскольку белый слой в бандажах колес связан с образованием особых закалочных структур, то от содержания углерода в стали зависит интенсивность его возникновения. Поэтому Т.В. Ларин и В.П. Девяткин считают, что бандажная сталь должна содержать углерода не более 0,45%. Для повышения сопротивления пластической деформации следует применять легирующие добавки, которые затрудняют структурные превращения.

Делаются попытки использовать химико-диффузионные процессы при трении для упрочнения поверхностей трения.

Белый слой является ярким проявлением образования новых структур. Помимо него в процессе трения в связи с температурным фактором возможны коагуляция структурных составляющих, закалка и отпуск, что может привести к образованию ультрамикроскопических трещин.

На вкладышах подшипников с антифрикционным слоем оловянного баббита иногда образуется, напоминающая по внешнему виду нагар, твердая корка, не поддающаяся действию напильника и шабера. Относитель-

но чаще такая корка, неравномерная по толщине в наиболее нагруженной части подшипника до 0,4 мм, встречается в рамовых, мотылевых и головных подшипниках дизелей. По данным химического анализа, она содержит окислы олова, меди, сурьмы и небольшое количество углеродистых веществ. Твердость корки определяется содержанием наиболее твердого из окислов — окисла олова. Причины образования корки — местные повторяющиеся перегревы поверхности трения вследствие недостаточного смазывания либо наличие воздуха в масле. Эта корка обладает высокой износостойкостью, однако при разрушении ее крупные частицы будут действовать как абразив.

Глава 9 КОРРОЗИЯ, КАВИТАЦИОННОЕ И ЭРОЗИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

1. Коррозия [4]

Коррозией называют разрушение поверхности металла в результате химического или электрохимического воздействия среды. Чистая металлическая поверхность легко подвергается химическому воздействию среды. Однако, если в процессе начавшейся коррозии продукты ее образуют прочно связанную с металлом пленку, изолирующую поверхность от коррозионной среды, то металл приобретает пассивность по отношению к ней. Процесс искусственного образования тонких окисных пленок на. поверхности металла для защиты его от коррозии и придания изделию лучшего вида называют пассивированием. Способностью к пассивированию обладают железо, никель, хром, алюминий и другие металлы.

Химическая коррозия протекает при взаимодействии металлов с сухими газами и парами и жидкими неэлектролитами. Остановимся на газовой коррозии. Этому виду коррозии подвержены в большей или меньшей степени цилиндры двигателей внутреннего сгорания, выпускные клапаны, камеры сгорания газовых турбин, элементы паровых котлов и пароперегревателей, арматура печей и т. п. Среди процессов газовой коррозии наиболее часто встречается окисление металла при высоких температурах за счет кислорода воздуха или CO_2 и O_2 в продуктах сгорания топлива [6].

На поверхности углеродистой стали газовая коррозия проявляется в виде пленок окислов уже при температуре 200...300°С. С повышением температуры примерно до 600°С в связи с образованием под действием внутренних напряжений трещин в защитной пленке скорость коррозии возрастает, оставаясь все же довольно низкой. При дальнейшем подъеме температуры скорость коррозии резко увеличивается, и образуется окалина.

Опыты с образованием окислов на чугунах в различных газовых средах, выполненные Э.О. Травицкой, показали, что скорость коррозии при возрастании температуры от 500 до 800°С увеличивается в сухих газах в 11...13 раз и во влажных в 20 раз. Скорость окисления в среде CO_2 не только выше, чем в воздухе (сухом и влажном), но и выше, чем в O_2.

На алюминии и его сплавах защитная пленка быстро достигает наибольшей толщины при температуре 300...600°С, прекращая процесс газовой коррозии. У железоуглеродистых сплавов при газовой коррозии наблюдается обезуглероживание поверхностных слоев металла, что снижает его механические характеристики, при этом существенно уменьшается сопротивление усталости и поверхностная твердость.

Поскольку объем окислов больше, чем объем металла, из которого они образовались, то проникновение окисляющих газов в микротрещины и по границам графитовых включений приводит к "росту чугуна" — увеличению его объема, что иногда наблюдается при газовой коррозии не подвергнутого старению чугуна.

Электрохимическая коррозия протекает при действии на металлы жидких электролитов, например, разрушение гребного вала в морской воде при отсутствии протекторной защиты.

Электрохимическая коррозия обусловлена неоднородностью металла в контакте с электролитом. Эта неоднородность проявляется в различных формах. Неоднородность сплавов связана с тем, что они состоят из двух и более структурных составляющих. Неоднородное физическое состояние металла обусловлено различием между зерном и его границей, неоднородностью структуры (ликвация, газовые пузыри и неметаллические включения). Различное напряженное состояние смежных участков детали под нагрузкой изменяет физическое состояние даже однородного металла. Различие в концентрации раствора электролита, смачивающего металл, и неодинаковые условия подвода кислорода к различным участкам поверхности — это иная категория неоднородности состояния; к ней можно отнести и неодинаковую температуру участков поверхности. Существование на поверхности металла микроучастков с различными электрическими потенциалами является причиной образования огромного количества гальванических микроэлементов, в результате работы которых происходит коррозия.

На скорость коррозии влияет температура (с повышением ее коррозия усиливается) и скорость смывания средой металлической поверхности; при значительной скорости среды коррозия усиливается под действием эрозии.

В некоторых машинах можно встретиться с щелевой коррозией, при которой коррозионные повреждения сосредоточены в зазоре между поверхностями. Зазором могут быть щели между листами, зазоры в сопряжениях и стыках, зоны трещин в металле, а также щели между осевшими или прилипшими к поверхности посторонними веществами. В среде электролита щелевая коррозия обязана различной концентрации металлических ионов внутри и вне щели, а в среде воздуха она связана с неравномерной аэрацией. Малодоступные для кислорода или электролита участки поверхности металла в зазоре или щели становятся анодом по отношению к остальной поверхности, к которым кислород или электролит имеет свободный доступ и которые становятся катодом.

Щелевой коррозии подвержены даже металлы, которые устойчивы к другим видам коррозии благодаря образованию на их поверхностях пленок, обладающих высокими защитными свойствами. Вибрации и эпизодические относительные микросмещения поверхностей повреждают образующуюся защитную пленку в щели, благоприятствуют ее удалению, и, создавая условия для большей неравномерности концентрации среды, способствуют более интенсивной коррозии в щели. Коррозионно-стойкие стали, титан в кислотной среде и алюминий подвержены щелевой

коррозии. Последняя может встречаться в сопряжениях втулка — корпус, в упорных подшипниках, подшипниках качения при пульсирующем контакте, открытых шарнирных сочленениях, в некоторых электромагнитных устройствах и др. Шариковые подшипники из хромистых коррозионностойких сталей при работе в воде, особенно при высоких температурах, могут подвергаться щелевой коррозии, что приводит к увеличению момента трения. Так крутящий момент шарикоподшипника при температуре 260°С в 2 раза больше, чем у подшипника, испытанного при температуре 93°С. Осевые и радиальные зазоры существенно снизились в обоих случаях. При испытании подшипники некоторое время не вращали, чтобы внутри их создавались условия застойной среды [6].

Рассмотрим частный случай щелевой коррозии из-за дифференциальной аэрации, обнаруженной С.В. Пинегиным при изучении контактной прочности элементов шарикоподшипников. На электромагнитном пульсаторе он исследовал характер повреждения контактных поверхностей при многократном сдавливании без перекатывания упругих стальных тел, ограниченных сферической и плоской поверхностями. Диаметр сферы 40 мм. Образцы были из стали ШХ15 с микроструктурой, соответствующей микроструктуре подшипниковых деталей. Минимальная нагрузка F_{min} = 490 Н, максимальная F_{max} = 4900 Н. Расчетные давления в центре площадки контакта сферы с плоскостью p_{min} = 15 ГПа, p_{max} = = 32 ГПа. Расчетные полуоси круговых контактных площадок a_{min} = = 0,401 мм, a_{max} = 0,864 мм. После испытания на плоскости вокруг центра площадки контакта обнаружено четыре зоны (рис. 9.1). Зона *I*—сравнительно правильной формы контактная площадка, соответствующая минимальной сжимающей силе. Поверхность к краям понижается на 12... 20 мкм. Зона *II* представляет собой впадины глубиной до 100 мкм, заполненные продуктами окисления. Зона *III* — кольцевой участок контактной поверхности со следами интенсивного изнашивания; уровень этого участка на 18 ... 40 мкм ниже участков поверхности, не затронутых износом. За зоной *III* расположена зона *IV*, состоящая из пятнистых и точечных следов коррозии без следов механического воздействия. Применение различных масел не изменяет описанной картины явления.

Возникновение коррозии объясняется следующим. При циклическом деформировании поверхностей сферы и плоскости происходит попеременно выталкивание и вклинивание воздуха в пространство между ними. Вследствие большой частоты циклов и сопротивления воздух неравномерно омывает поверхности вокруг площадки постоянного контакта. Чем ближе к зоне *I*, тем менее доступно для воздуха клиновое пространство. Зоны II...IV являются анодом. Наибольшему коррозионному

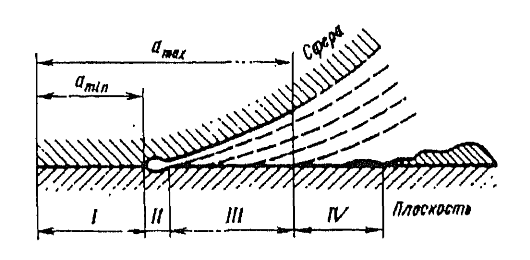


Рис. 9.1. Схема развития коррохии поверхностей трения при пульсирующем контакте под влиянием неравномерной аэрации поверхностей

воздействию подвержена зона //, где действуют значительные переменные напряжения и относительно высокие температуры.

Пыль, даже химически неактивная, оседая на незащищенную металлическую поверхность или находясь под слоем смазочного материала, вызывает коррозию. Это объясняется тем, что к местам, покрытым пылью, затруднен доступ воздуха и ухудшается взаимодействие смазочного материала с металлом. Пыль поверх смазочного материала подобного эффекта не производит.

В газотурбинных двигателях при использовании в качестве топлива высокосернистых мазутов с большим содержанием ванадия и натрия Р.А. Лапштейн и др. установили возникновение коррозии жаропрочных сталей и сплава нимоник. При температуре около 600°С на сталях и сплаве образуется защитная пленка окислов αFe_2O_3 — αCr_2O_3 или $FeCr_2O_4$ и $NiFe_2O_4$. В процессе горения топлива образуется V_2O_5, а хлористый натрий переходит в Na_2S0_4 с образованием их производных, входящих в состав золы. У соединения $Na_2O \cdot V_2O_5$ и им подобных более низкая температура плавления, чем у V_2O_5. Уже при температуре 650°С происходит плавление. Расплавленные соединения растворяют защитную окисную пленку, образуют поры в окалине, проникают к границе сплав — окисел, способствуя дальнейшему разрушению окисла. Процесс окисления начинается вновь.

Газовая коррозия, как и электрохимическая, не является видом изнашивания. Коррозия может проявляться при кавитационном разрушении и фреттинг-коррозии, во многих случаях протекает параллельно с эрозией, всегда облегчает ее и сопровождает процесс трения, в особенности трения без смазочного материала, существенно влияя на износ рабочих поверхностей деталей.

Коррозия рабочих поверхностей деталей у неработающих машин снижает износостойкость пар трения по следующим причинам: у неработающих пар ухудшается качество поверхности и после пуска машины снова начинается приработка; продукты коррозии действуют как абразив; срабатывание продуктов коррозии, происходящее за малое время, сопряжено с быстрым изменением линейных размеров детали в неблагоприятную сторону. Иногда действуют особые условия. У неработающих электрических машин, установленных в сырых местах, угольно-графитная щетка, коллектор или контактное кольцо и влажный воздух между ними образуют гальванический элемент. В итоге на коллекторах и контактных кольцах образуются пятна матового оттенка, под щеткой появляется окись. При работе машины пятна вызывают искрение щеток, шероховатость мест пятнообразования возрастает, что усиливает искрение щеток.

Даже небольшая коррозия на контактирующих металлических поверхностях (сталь ШХ15), работающих в условиях трения качения и высоких нагрузок, как и насыщение смазочного материала влагой, сильно снижает предел контактной выносливости поверхностей.

Атмосферная коррозия и наводороживание. При атмосферной коррозии происходит интенсивное наводороживание стальных деталей. У стали, насыщенной водородом, резко снижается сопротивление механическим нагрузкам и износостойкость (см. гл.6).

Таблица 9.1

Место испытания	Содержание водорода, мл/100 г	
	до испытания	после испытания
Норильск	1,3	105
Батуми	1,3	45,2
Хотьково (Московская обл.)	1,3	32,2

Интенсивность наводороживания при атмосферной коррозии зависит от влажности и загрязненности воздуха промышленными газами, например H_2S. Данные К.В. Попова по поглощению водорода образцами из стали 20 при атмосферной коррозии в различных климатических условиях приведены в табл. 9.1.

Сильное наводороживание стали в Норильске нельзя, конечно, объяснить только климатическими условиями. Если бы это явление было связано с влажностью воздуха, то наиболее интенсивное наводороживание следовало бы ожидать в Батуми. Возможно на процесс наводороживания в Норильске большое влияние оказала загрязненность воздуха такими промышленными газами, как H_2S. Представляет интерес проследить, как с увеличением содержания водорода уменьшается число перегибов испытуемых пластин, что характеризует пластичные свойства образцов:

Содержание водорода, мл/100 г	1	2	4	6	8	10	12	14	54
Число перегибов	12	10	10	10	10	6	6	6	6

Образцы с содержанием водорода 10 мл/100 г и выше разрушаются хрупко с множеством трещин в зоне излома.

При работе подвижных деталей многих видов техники коррозионные процессы занимают большое место, особенно в процессе окислительного изнашивания и изнашивания при фреттинг-коррозии. При таких видах изнашивания неизбежно произойдет наводороживание поверхности, образование микротрещин, резкое снижение сопротивления усталости и уменьшение сроков службы узлов трения.

2. Кавитационное изнашивание

2.1. Гидродинамическая кавитация

Кавитация дословно означает полость, каверна. Однако под кавитацией понимают явление образования в движущемся по поверхности твердого тела потоке жидкости пустот в виде пузырей, полос и мешков, наполненных парами, воздухом или газами, растворенными в жидкости и выделившимися из нее. Это явление обусловлено следующим. В движу-

щемся с большой скоростью потоке при его сужении и наличии препятствий на его пути давление может упасть до давления, соответствующего давлению парообразования при данной температуре. При этом, в зависимости от сопротивления жидкости растягивающим усилиям, может произойти разрыв, нарушение сплошности потока. Образующаяся пустота заполняется паром и газами, выделившимися из жидкости. Воздух, вовлекаемый в поток, облегчает возникновение кавитации. Образовавшиеся парогазовые пузыри размерами порядка десятых долей миллиметра, перемещаясь вместе с потоком, попадают в зоны высоких давлений. Пар конденсируется, газы растворяются, и в образовавшиеся пустоты с громадным ускорением устремляются частицы жидкости; происходит сопровождаемое ударом восстановление сплошности потока.

Киносъемка показала, что кавитационный пузырек может вырасти за 0,002 с до 6 мм в диаметре и полностью разрушиться за 0,001 с. По данным В.Я. Карелина, при определенных типах кавитации на площади в 1 см^2 в течение 1 с могут образоваться и разрушиться более 30 млн. кавитационных пузырьков [2].

Кавитация наблюдается в трубопроводах, в гидромониторах и в потоках, обтекающих лопатки центробежных и пропеллерных насосов и лопастей гидравлических турбин и гребных винтов. Явление кавитации вызывает вибрации, стуки и сотрясения, что приводит к расшатыванию крепежных связей, обрыву болтов, смятию резьб, фрикционной коррозии стыков, нарушению уплотнений и усталостньм поломкам.

Кавитация понижает КПД машин и гребных винтов и вызывает непосредственное разрушение поверхностей деталей в зоне ее действия. Она способствует закоксовыванию распылителей форсунок двигателей внутреннего сгорания.

Труднообтекаемая форма и неровности поверхностей, включая неровности, образовавшиеся по причине кавитационного изнашивания, служат причиной образования вихрей и отставания струй от стенок рабочих каналов, что способствует возникновению или усилению кавитации.

Предпосылки для наступления и протекания кавитационного изнашивания следующие. При замыкании до полного исчезновения парогазовых пузырей у поверхности детали последняя подвергается микроскопическим гидравлическим ударам (рис. 9.2). Из нескольких миллионов образуемых кавитационных пузырьков примерно один из 30 тыс. принимает участие в разрушении. Под воздействием ударов поверхность металла начинает деформироваться и наклепываться на малую глубину; появляются линии сдвига, и происходит как бы своеобразное травление

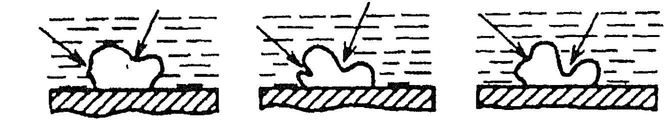




Рис. 9.2. Схема гидравлических ударов при сокращении навигационного пузыря

с выявлением границ отдельных зерен. Многократно повторяющиеся удары вызывают разупрочнение, перенаклеп материала на отдельных микроучастках, сопровождающиеся возникновением очагов разрушения в виде трещин. Разрушается прежде всего менее прочная структурная составляющая (в сталях феррит, в чугунах — графитовые включения). За разрушением малопрочной составляющей может последовать выкрашивание и более прочных составляющих. Разрушение развивается в пределах зерен или по их границам в зависимости от соотношения прочности зерна и связи между зернами.

Коррозионные явления играют существенную роль в процессе кавитационного изнашивания. Например, в морской воде интенсивность изнашивания намного выше, чем в пресной при прочих равных условиях. Однако механическим воздействиям принадлежит основная роль, свидетельством чему может служить низкая кавитационная стойкость лакокрасочных, цинковых и алюминиевых покрытий, имеющих малую механическую прочность, эбонита и плексигласа, являющихся коррозионностойкими неметаллическими материалами. Скорость кавитационного изнашивания может быть в сотни и более раз выше скорости коррозионного разрушения поверхностного слоя.

Предупредить кавитацию можно, проектируя гидромеханическую систему так, чтобы во всех точках потока давление не опускалось ниже давления парообразования. Однако возможность кавитации всегда следует учитывать.

Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от температуры, свойств жидкости и природы материала деталей. Влияние вязкости незначительно. С увеличением поверхностного натяжения изнашивание происходит более интенсивно. Введение в воду веществ, образующих и способствующих образованию эмульсий (масла и эмульгаторы), понижает поверхностное натяжение и снижает кавитационное изнашивание. Воде с температурой 50°C соответствует наибольшая интенсивность изнашивания. По обе стороны от этой температуры наблюдается довольно резкое падение интенсивности изнашивания.

Кавитационная стойкость материала определяется его составом и структурой. Повышение содержания углерода в углеродистой стали увеличивает ее стойкость. Однако, начиная с 0,8% C, она начинает падать. Пластинчатый перлит более стоек, чем зернистый. Введение никеля и хрома в сталь повышает ее стойкость за счет снижения количества феррита, увеличения степени дисперсности и др. Шаровидная форма графита благоприятна. Наиболее стойким является низколегированный чугун (1% Ni, 0,3% Mo) с шаровидным графитом.

Закалка с нагревом ТВЧ, цементация, поверхностное упрочнение в том числе твердые наплавки, сообщают стали значительную кавитационную стойкость. То же относится к хромовому покрытию при достаточной его толщине (около 40 мкм) и сплошности (молочный хром). При малой толщине (менее 20 мкм) разрушение происходит под слоем хрома; существенную роль играет прочность основания. Латунь благодаря своей

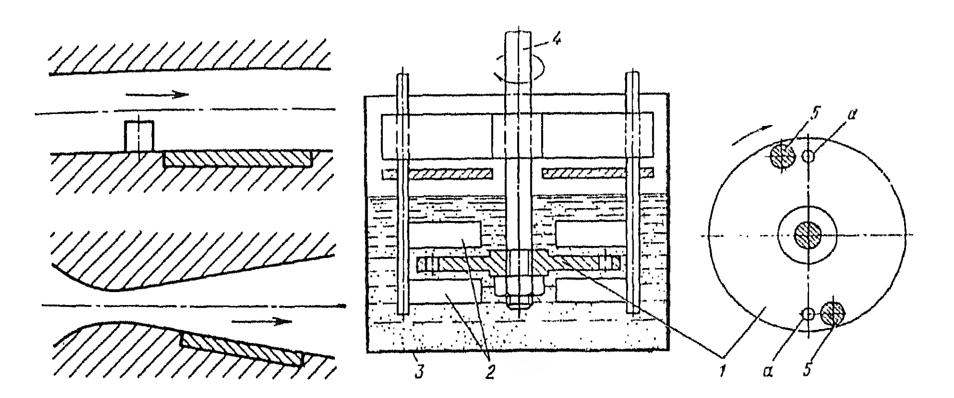


Рис. 9.3. **Схемы рабочих камер кавитационных труб**

Рис. 9.4. **Кавитационная установка с вращающимся диском**

вязкости стойка к кавитационному изнашиванию. Сравнительно хорошей кавитационной стойкостью обладает резиновое покрытие.

Кавитационное разрушение материалов подробно исследовано С.П. Козыревым, К.К. Шальновым, И.Н. Богачевым, Р.И. Минцем, В.В. Фоминым и др. [1, 3].

Кавитационное разрушение изучают с помощью специальных устройств, устанавливаемых в рабочих камерах кавитационных труб (рис. 9.3). Кавитационная зона, возникающая за препятствием или после сужения трубы, наблюдается в виде белого облака; при этом возникает шум различного тембра [3].

Имеются установки, в которых кавитация создается диском, вращающимся в воде или другой жидкости (рис. 9.4). Диск *1* устанавливают на валу *4* и помещают в бак *3* с жидкостью. Для уменьшения кавитационной зоны установлены ограничители *2*. На диске крепят два испытуемых образца *5*, диаметром 20 мм, перед которыми по ходу вращения имеются два отверстия *а*, создающие кавитацию при большой частоте вращения диска (2050...2500 мин$^{-1}$) диаметром 244 мм. Во избежание большой закрутки воды сверху и снизу диска устанавливают предохранительные лопатки [3].

Для моделирования кавитационного изнашивания используют струеударный метод, состоящий в том, что используемые образцы ударяются о струю жидкости. Характер разрушения поверхности при струйном методе соответствует разрушению поверхности при кавитации (рис. 9.5).

2.2. Вибрационная кавитация [3]

При колебании твердого тела относительно жидкости или жидкости относительно твердого тела давление в жидкости на границе раздела жидкости и твердого тела может упасть и вызвать образование кавитационных пузырей. Условия кавитации зависят от внешнего давления на систему и насыщенности жидкости воздухом.

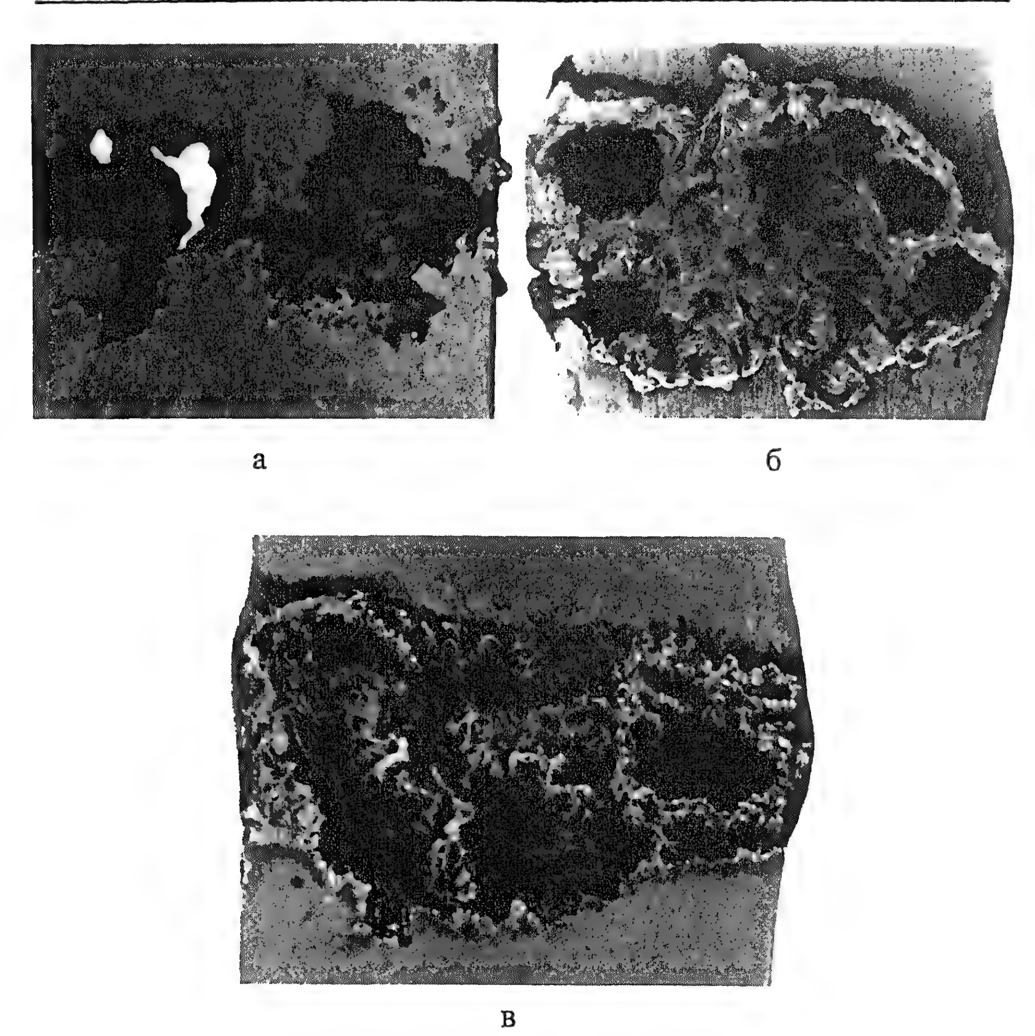


Рис. 9.5. **Кавитационные повреждения образцов после испытания:**
а – чугуна; *б* – алюминиевый сплав; *в* – медь

Вибрационную кавитацию могут вызвать звуковые колебания, особенно ультразвуковые. Звуковые волны ускоряют окислительно-восстановительные реакции, вызывают внутримолекулярные перегруппировки веществ, усиливают диспергирование, ускоряют процессы мойки и обезжиривания поверхностей и вызывают коагуляцию мелких частиц. При вибрации не исключается кавитация в тонком смазочном слое между поверхностями, которая может привести к выкрашиванию материала подшипников скольжения, зубьев колес и поверхностей других деталей.

Вибрационная кавитация проявляется в двигателях внутреннего сгорания, особенно на наружных поверхностях гильз в результате их колебаний от ударов поршня. Износ от кавитации наружной стенки гильзы может быть в 3—4 раза больше, чем износ внутренней поверхности от действия поршневых колец.

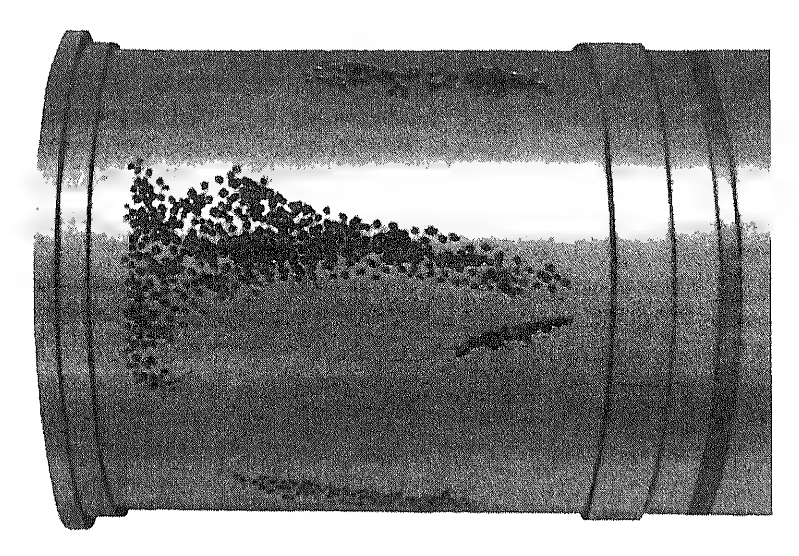


Рис. 9.6. **Гильза дизеля изношенная кавитацией**

На рис. 9.6 показана наружная поверхность гильзы двигателя, изношенная на глубину до 5 мм за 500 ч работы. Колебания, которые возбуждает гильза, передаются жидкостью на противоположную стенку блока двигателя и вызывают кавитационные повреждения.

Большую опасность представляет кавитационное разрушение опорных поясков гильз и блока цилиндров, что приводит к проникновению охлаждающей жидкости в полость цилиндра и в картер двигателя.

3. Эрозионное изнашивание

Эрозия в широком понятии — процесс поверхностного разрушения вещества под воздействием внешней среды. В машиностроении эрозия имеет более узкое понятие — разрушение поверхности материалов вследствие механического воздействия высокоскоростного потока жидкости, газа или пара. Разрушение металлов под действием электрических зарядов также относится к эрозии. Л.А. Урванцев подразделяет эрозию на газовую, кавитационную, абразивную и электрическую. Каждый вид эрозии имеет подвиды, которые являются сочетанием отдельных видов, например, газовая эрозия может быть газоабразивной, газоэлектрической и т.д. [5].

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара в чистом виде слагается из трения сплошного потока и его ударов о поверхность. В результате трения происходит расшатывание и вымывание отдельных объемов материала. Вообще говоря, скорость изнашивания в этом случае мала. Несравненно большая роль принадлежит динамическому действию потока или струи. В зависимости от свойств

материала возможны вырывы отдельных объемов или групп зерен с неблагоприятной ориентацией в отношении приложенных сил. В пластичных материалах, обладающих способностью наклепываться, вначале накапливаются микропластические деформации отдельных участков, а когда способность к упрочнению исчерпается, эти участки разрушаются, вымываются. Жидкость, внедряющаяся при ударах в образовавшиеся микротрещины, ведет себя подобно клину, раздвигая боковые стенки.

Эрозия в начальный период на гладкой поверхности развивается весьма медленно, но после появления пораженных мест усиливается. Это можно объяснить повышением хрупкости поврежденного поверхностного слоя в связи с накоплением микротрещин, расклинивающим действием жидкости и усилением ударного действия из-за большого вихреобразования у поверхности.

Разрушению от эрозии часто подвергаются отсечные кромки золотников гидравлических агрегатов (рис. 5.3). Струи топлива, проникая во время отсечки с большой скоростью в зазор между цилиндрическими поверхностями золотника и втулки, разрушают металл у отсечной кромки. Это случай щелевой эрозии, которой подвержены клапаны запорных и регулирующих устройств гидравлических и паровых систем. Эрозия может возникнуть под воздействием жидко-металлических теплоносителей в энергетических установках. Такие теплоносители могут оказать сильное эрозионно-коррозионное воздействие на те или иные компоненты жаропрочных сталей [7].

Эрозионному изнашиванию подвержены стальные и чугунные поршневые кольца авиационных двигателей (рис. 9.7). Кольцо скользило по хромированной поверхности восстановленного при ремонте зеркала цилиндра. Из-за плохой прирабатываемости колец не обеспечивается достаточное их прилегание к стенкам цилиндра, происходит прорыв газов и интенсивный местный нагрев рабочей поверхности кольца. Отдельные, наиболее размягченные частицы металла отрываются и уносятся потоком газов. Более стойкие структурные составляющие, оказываясь изолированными, тоже поддаются разрушению. На поверхности образуются продолговатые раковины ветвистого строения (см. рис. 9.7). Эрозионное изнашивание начинается часто с микроцарапин, возникающих при схватывании поверхностей трения. Эрозионному повреждению в данном случае сопутствует образование белого слоя. Уменьшить разрушение колец

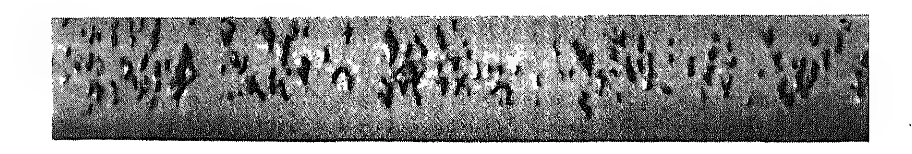


Рис. 9.7. **Поверхность поршневого кольца авиационного двигателя, пораженная эрозией**

можно улучшением их приработки. Характерно, что на чугунных хромированных кольцах, работающих по азотированной поверхности цилиндра заводского производства, эрозия не наблюдалась.

В начале эксплуатации крупнотоннажных одновинтовых танкеров были случаи эрозионных повреждений подшипников аварийного характера. Гребные валы диаметром свыше 600 мм, облицованные бронзовой рубашкой, работают в обычных баккаутовых подшипниках при смазывании водой. Повреждения на рубашке имели вид явно выраженных продолговатых пятен, равномерно расположенных по окружности по числу лопастей гребного винта, на некотором расстоянии от кормового среза дейдвудной трубы. Пятна были покрыты глубокими рисками. Набор баккаутовых колец, в отличие от обычного для него износа, в том же районе имел глубокие местные язвины; наблюдался даже вырыв планок. На одном из судов, где гребной вал был уложен на подшипники из резинометаллических сегментов, некоторые сегменты были разрушены и сорваны с мест.

Такая эрозия возникает в результате поперечных колебаний гребного вала, вызванных неуравновешенными гидродинамическими силами на гребных винтах. Частота колебаний кратна числу лопастей на винте. Можно представить, что при определенных положениях лопастей вал, имея при колебаниях перемещения вниз, с большой силой выдавливает воду, которая, устремясь к концам кормового подшипника, вызывает эрозию. Для борьбы с такими явлениями можно изготовить продольные и кольцевые канавки, которые должны уменьшить гидравлическое давление в подшипнике [8].

Эрозионное изнашивание во многих случаях было бы слабее, если бы не было присутствия посторонних частиц в потоке. Так, лопатки ступеней низкого давления паровых турбин при отсутствии промежуточного перегрева подвергаются ударам капелек воды, содержащихся в насыщенном паре и поступающих вместе с ним со скоростью 300...400 м /с; не исключается также некоторая роль химических явлений. Наилучшую сопротивляемость эрозионному изнашиванию в этом случае показали лопатки из аустенитных сталей. Лопатки первых ступеней турбин подвержены эрозии под действием пара, несущего частицы соли при недостаточной очистке воды, подаваемой в паровой котел.

Если поток содержит абразивные частицы, то изнашивание становится эрозионно-абразивным.

Эрозия и коррозия весьма часто протекают совместно. Коррозионно-эрозионное изнашивание представляет собой разновидность коррозионно-механического изнашивания. Роль обоих факторов зависит от соотношения механического и химического воздействия на материал.

В качестве типичного примера можно привести гребные винты, разрушение которых от коррозии и эрозии существенно усилилось с переходом от паровых поршневых машин, как главных двигателей, к паровым турбинам с повышенной частотой вращения винтов на кораблях, благодаря чему это явление привлекло внимание многочисленных исследователей. Подробное изучение вопроса позволило создать представление о

роли эрозии в зависимости от угловой скорости винта, обусловливающей динамическое воздействие потока. Эрозия удаляет с лопастей винта продукты коррозии, образующие защитную пленку, оголяет металл, тем самым значительно ускоряя процесс его разрушения. При малых динамических воздействиях потока в лопастях развиваются усталостные трещины. Более сильное воздействие в недостаточно стойком против эрозии материале приводит к хрупкому разрушению. Вибрация лопастей винтов может вызвать в местах перегибов (в узлах колебаний) появление небольших трещин, разрыхление металла в связи с вымыванием мягких частиц и большее повреждающее действие эрозии.

О роли конструктивного фактора в стойкости гребных винтов против эрозионного изнашивания можно судить по тому факту, что на одних и тех же быстроходных кораблях с винтами из латуней марка материала и качество изготовления винтов одинаковы, винты неудачной конструкции выходили из строя после 40 ч службы, в то время как другие служили без ремонта до 10 лет. В гидротурбинных установках эрозионный эффект, естественно, будет меньшим из-за более низкой агрессивности среды, но тем не менее он весьма существен.

Газовая коррозия и эрозия действуют совместно, например, в выпускных клапанах высоконапряженных деталей двигателей внутреннего сгорания и на входных кромках лопаток компрессора газотурбинных двигателей. При замене лопаток из алюминиевых сплавов на стальные эрозионное изнашивание кромок лопаток перестало иметь практическое значение.

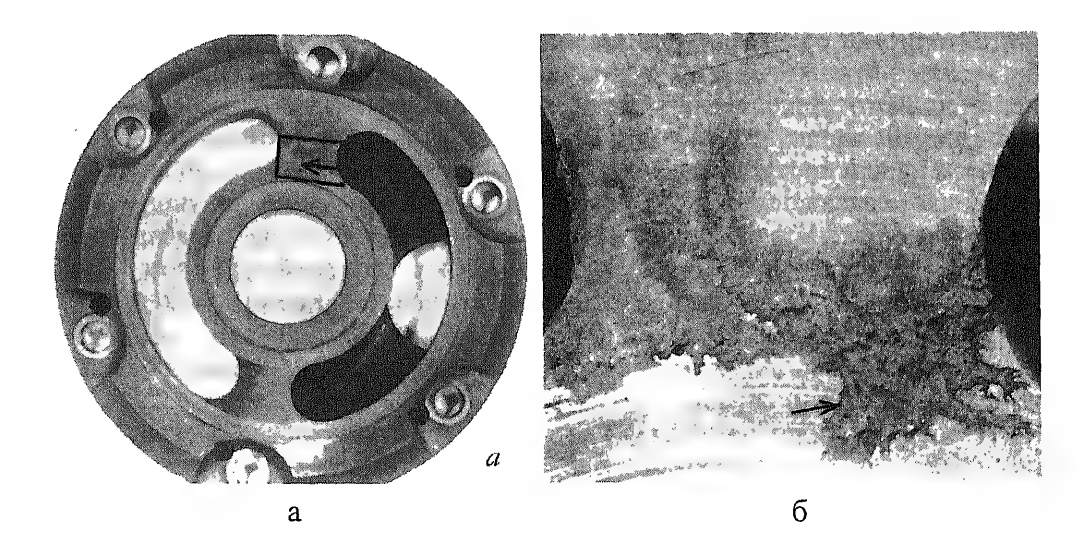


Рис. 9.8. **Кавитационно-эрозионное разрушение золотника плунжера керосинового насоса высокого давления:**
а – общий вид; *б* – место разрушения

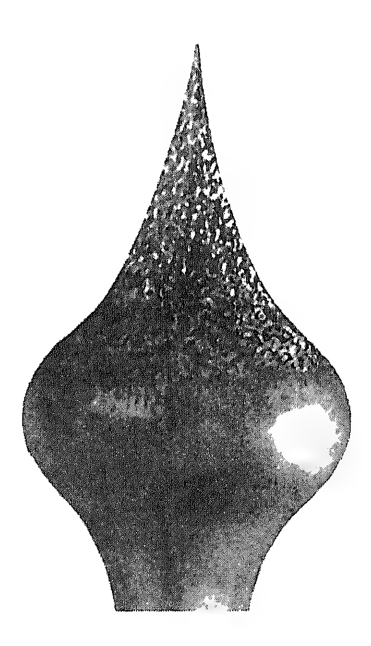


Рис. 9.9. **Повреждения регулирующей иглы струйно-ковшовой турбины после 9000 ч работы**

Случай кавитационно-эрозионного разрушения поверхности плоского золотника плунжерного керосинового насоса высокого давления показан на рис. 9.8. Внешний вид поврежденного участка с губчатым строением и с большой ноздреватостью характерен для кавитации.

Поверхностный слой деталей насосов, гидравлических турбин, трубопроводов и их арматуры, сит, грохотов, центрифуг и тому подобных деталей машин и оборудования аппаратов размывается потоком воды, содержащим абразив. Скорость эрозионного изнашивания зависит от свойств твердых частиц, их концентрации, скорости движения в потоке и степени агрессивности воды. Ряд двигателей и узлов гидротурбинного оборудования установок на реках с большим размером твердого стока (наносов) иногда подвергается разрушению преимущественно от эрозионно-абразивного изнашивания при наличии незначительного коррозионного разъедания. Однако в других случаях действие кавитации и коррозии оказывается значительным.

Действие всех трех видов повреждения можно наблюдать на регулирующей игле струйно-ковшовой турбины (рис. 9.9). Вода входит в сопло с большой скоростью, и в начальной части иглы благодаря малым радиусам кривизны поток отрывается от поверхности "яблока", затем в связи с увеличением сечения скорость несколько падает, повышается давление, конденсируются водяные пары, и возникают гидравлические удары.

Острие иглы повреждается от кавитационного изнашивания. К зоне кавитационного повреждения примыкает участок коррозионного разъедания. Далее располагается зона с явно выраженным эрозионным износом в виде царапин, направленных по линии потока воды.

Агрессивность среды вносит особенности в процесс эрозионного изнашивания, поэтому не все закономерности абразивного процесса справедливы для эрозионно-абразивного изнашивания. В этом случае материалы должны обладать коррозионной стойкостью и сопротивлением абразивному воздействию. Степень этих качеств должна варьироваться в зависимости от влияния каждого фактора. Это же следует учитывать и при коррозионно-эрозионном изнашивании.

Горячая газовая эрозия пластических масс и теплозащитных покрытий в последние годы получила название абляции. Это явление проявляется, например, под воздействием аэродинамического нагрева при вхождении баллистического снаряда в плотные слои атмосферы или под действием высоконагретых отработавших газов при работе ракетных двигателей. Абляция сопровождается тепловыми и механическими эффектами и включает целый ряд явлений: эрозию от ударов твердых частиц или капель; срезание материала от действия аэродинамических усилий; шелушение (растрескивание и отпадание чешуек от теплового расширения); сдувание расплавленного материала потоком газов; сублимацию; испарение; пиролиз; сгорание.

Стойкость пластмасс к абляции зависит от теплопроводности. В противоположность металлам пластмассы должны иметь низкую теплопроводность. Детали, отлитые под высоким давлением, лучше сопротивляются абляции по сравнению с деталями, отлитыми при низком давлении.

Глава 10 КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИЗНАШИВАНИЕ В СОПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЯХ МАШИН

Коррозия металла в той либо иной среде может происходить независимо от того, имеется трение или нет; совместное действие коррозии, нагружения и механического изнашивания усиливает интенсивность разрушения поверхностей деталей. Бывают, однако, случаи, когда коррозия становится активной только благодаря трению в сопряжении деталей [1].

1. Коррозионно-механическое изнашивание цилиндро-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания

Поршневые кольца и цилиндровые втулки (гильзы) двигателей, изготовленные из литейных чугунов, при наличии электролита образуют гальванические пары как друг с другом, так и между структурными составляющими чугуна — перлитом, графитом, фосфидной эвтектикой, а внутри перлита между цементитом и ферритом. Кроме того, вследствие неравномерности температуры образуются анодные участки в областях с более высокой температурой. Точно так же анодный участок появляется в областях с более интенсивным облучением.

Сжигание в цилиндрах дизелей топлив с повышенным содержанием серы увеличивает интенсивность изнашивания поршневых колец и цилиндровых втулок в 3...4 раза и более. Сера сгорает, образуя SO_2, и только около 7% ее идет на образование SO_3 в результате каталитического окисления SO_2. Серный ангидрид SO_3 с водяными парами продуктов сгорания образует серную кислоту. Влияние серы на коррозию связано с явлением конденсации H_2SO_4. Температура конденсации двухкомпонентной смеси H_2O и H_2SO_4 значительно выше, чем температура конденсации чистого водяного пара, поэтому в конденсат начинает выпадать концентрированная серная кислота. Для конденсации серной кислоты из продуктов сгорания на стенки цилиндра необходимо, чтобы температура точки росы двухкомпонентной смеси H_2O и H_2SO_4 превышала температуру рабочей поверхности втулки. Такие условия существуют. Так, при содержании в дизельном топливе 0,9% S, давлении вспышки 6 МПа и коэффициенте избытка воздуха 2 температура точки росы смеси при положении поршня в верхней мертвой точке (ВМТ) составляет 245°С, а в среднем положении поршня 215°С. Между тем в ряде судовых двухтактных дизелей температура стенки цилиндровой втулки при положении поршня в ВМТ 130...140°С. В таких двигателях можно ожидать примерно одинакового износа на всей верхней рабочей половине втулки. При более высо-

кой тепловой нагрузке, когда температура рабочей поверхности в верхней части втулки превышает 200°С, наибольшему коррозионному воздействию будет подвергаться средняя часть втулки — район выпускных и продувочных окон. Эпюра износа будет иметь бочкообразный характер.

Некоторого снижения интенсивности изнашивания можно достигнуть повышением температуры стенок за счет регулирования количества охлаждающей воды, но кардинальным решением является нейтрализация выпавших на стенки кислот с помощью щелочных добавок в смазочное масло. Имеется ряд эмульсионных цилиндровых масел, снижающих интенсивность изнашивания цилиндро-поршневой группы при работе двигателя на сернистом топливе, но применение некоторых из них сопровождается повышением корродирующей способности картерного масла по отношению к антифрикционному металлу подшипников вследствие попадания в картер цилиндрового масла.

Коррозионные процессы между неподвижными поверхностями изучать легче, чем между подвижными поверхностями, где процессы трения осложняются явлением коррозии и порой могут привести к неожиданным результатам. Известно, например, что хром благороднее чугуна, хотя это может быть не во всех случаях. Ван-дер-Хорст испытывал двухцилиндровый двухтактный с прямоточной продувкой дизель с диаметром цилиндра 190 мм, мощностью 74 кВт на топливе, содержащем 2,5% серы, смазочное масло дистиллатное, конечная температура охлаждающей воды 65°С, цилиндр с хромовым покрытием, поршневые кольца чугунные. Поршень электрически изолирован от штока, поршень и цилиндр присоединены к катодному осциллографу [5].

После работы двигателя в течение 30 мин на холостом ходу наблюдалась незначительная разность потенциалов. Это означало, что в пространстве между цилиндром и поршневыми кольцами не было электролита и непосредственного контакта. При работе двигателя под нагрузкой 54 кВт в течение 40 мин потенциал цилиндра был на 300 мВ положительное потенциала поршня, что объясняется присутствием между поверхностями трения электролита высокой электрической проводимости и пребыванием хрома в состоянии пассивности. Еще через 15 мин началось разблагораживание электродного потенциала цилиндра при положении поршня в ВМТ. Через 1 ч установилось состояние, сохранившееся стабильным до конца 40-часового испытания, а именно: верхняя часть поверхности цилиндра высотой около 60 мм обладала потенциалом на 40 мВ отрицательнее потенциала поршня; потенциал следующих 60 мм высоты оказался положительное потенциала поршня; в нижней части цилиндра не наблюдалось сколько-нибудь существенной разницы потенциалов.

Коррозионный фактор может стать составной частью процесса изнашивания двигателей внутреннего сгорания, независимо от рабочего процесса в них. Так, при сгорании бензина помимо водяных паров образуются двуокись углерода, небольшое количество окислов серы из органических сернистых соединений в составе топлива, окись азота в весьма

малых количествах (результат окисления азота при высокой температуре сгорания рабочей смеси) и соединения брома или хлора, выделяемого из тетраэтилсвинца, входящего в состав топлива в качестве антидетонатора. В итоге взаимодействия с водяными парами эти продукты образуют кислоты — угольную, сернистую, серную, азотистую и азотную, бромистоводородную, соляную, которые в основном выносятся из цилиндра с отработавшими газами. При пониженной температуре стенок цилиндра кислоты легко конденсируются, повышая интенсивность изнашивания стенок и поршневых колец, коррозию поршня, бобышек и поршневого пальца. Испытания двигателя без регулирования температуры в системе охлаждения и такого же двигателя с термостатом показали, что износ деталей второго двигателя составлял 1/3...1/4 износа первого.

На поверхностях трения зеркала цилиндров двигателей внутреннего сгорания может и не наблюдаться каких-либо специфических признаков коррозионно-механического изнашивания, поверхности трения могут иметь блеск и малую шероховатость.

2. Коррозия подшипников

Проблема коррозии подшипников возникла после внедрения в быстроходные двигатели внутреннего сгорания антифрикционных свинцовых, медно-свинцовых и кадмиевых сплавов. Все антифрикционные сплавы в какой-то мере корродируют под воздействием органических кислот, содержащихся в маслах или образующихся в них во время работы. Масла, окисляясь, дают перекиси, которые вызывают реакции, заканчивающиеся образованием органических кислот. Воздействию последних слабо подвержены оловянные баббиты, сильнее реагируют свинцово-мышьяковистые сплавы и свинцовый баббит. По данным Б.В. Лосикова, коррозионная стойкость медно-свинцовых, свинцово-щелочных и кадмиево-серебряных сплавов в 500...1700 раз ниже, чем оловянных баббитов [2].

Процесс разрушения медно-свинцовых сплавов имеет следующие стадии: появление черных точек, концентрация их на отдельных участках поверхности, образование мелких каверн с пористой поверхностью, появление трещин между отдельными кавернами и выкрашивание кусков заливки по этим трещинам. Последовательное разрушение свинцово-щелочного сплава происходит следующим образом: вначале на гладкой блестящей поверхности появляются матовые шероховатые на ощупь пятна, представляющие собой скопления тончайших каналов, уходящих в глубь заливки на всю ее толщину; образование раковин в местах пятен; появление трещин между раковинами и выкрашивание заливки по линии трещин (рис. 10.1).

Органические кислоты со свинцом образуют свинцовые мыла, которые уносятся протекающим маслом; вымывание свинцовой составляющей сплава резко ослабляет его механическую прочность. Характерно, что в то время, как на нагруженной стороне подшипников вкладыши под-

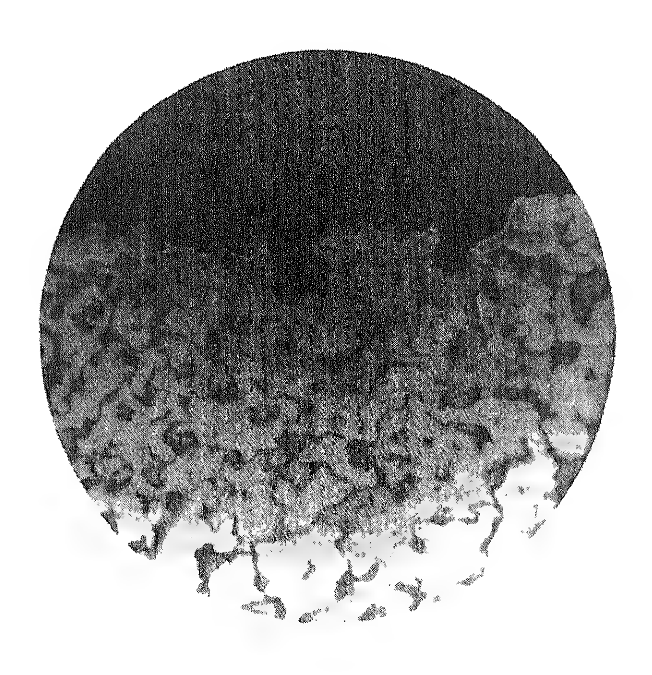


Рис. 10.1. **Сечение поврежденной коррозией поверхности подшипника из свинцовистой бронзы, x30**

вергаются интенсивному разрушению, вкладыши ненагруженной стороны очень медленно или вовсе не разрушаются. Таким образом, нагружение вкладыша значительно ускоряет процесс разрушения.

Проблема защиты от коррозии свинцовых, медно-свинцовых и кадмиевых сплавов была решена при использовании антикоррозионных присадок к маслу. Эти присадки представляют собой органические вещества, содержащие серу и фосфор. Пассивизация поверхности подшипника происходит в результате образования на ней защитной пленки, ближайшие к металлу слои которой связаны с ним химически, а последующие слои удерживаются силами физической адсорбции. Пленка срабатывается и восстанавливается. Б.В. Лосиков установил, что для каждой пары сплав — присадка существует определенный температурный интервал, в котором присадка наиболее эффективна. Для большинства применяемых присадок он составляет 80...120°С. При более низкой температуре коррозионный процесс опережает образование пленки, а при более высокой температуре усиливается диффузия через пленку агрессивных ингредиентов масла [2].

Другой вид коррозии медно-свинцовых подшипников, заключающийся в разъединении медного каркаса, обязан накоплению в картерном масле кислот вследствие конденсации отработавших газов из цилиндра.

3. Изнашивание рубашек валов

Гребные валы в неметаллических подшипниках дейдвудов и кронштейнов, смазываемые водой, для защиты от коррозии покрывают рубашками в основном из бронзы или латуни. Опыт эксплуатации морских судов показал, что алюминиевые бронзы и марганцовисто-железистые латуни непригодны в качестве материала для облицовки. Эти сплавы коррозионно-стойки в морской воде благодаря защитному действию первоначально образующихся поверхностных пленок, предохраняющих металл от дальнейшего разрушения. На поверхностях трения эти пленки изнашиваются, и коррозионная стойкость падает. Особенно быстро разрушаются такие компоненты как алюминий и железо. Из уже ослабленных участков выкрашиваются более стойкие составляющие. В дальнейшем разъединение облицовки приводит к интенсивному изнашиванию рабочей поверхности подшипника [4].

4. Изнашивание центробежных водяных насосов

Центробежные водяные насосы перекачивают морскую, речную, прудовую (или из скважин) воду с различным содержанием солей и взвешенных частиц. В ходе технологического процесса на предприятиях пищевой, химической и иных отраслей промышленности насосы перекачивают как кислые, так и щелочные воды. Для защиты от коррозии валы центробежных водяных насосов облицовывают рубашками (защитными втулками) из бронзы, стали или чугуна, работающими в паре трения с сальниковой набивкой. Если материал защитных втулок не способен образовать прочные пленки, то изнашивание будет коррозионно-механическим, а интенсивность его при прочих равных условиях зависит от агрессивности перекачиваемых вод. Об интенсивности изнашивания втулок можно судить по данным Н.А. Сологуба. На центробежных насосах низкого давления при перекачке прудовой воды средний износ защитных втулок из серых перлитного и перлито-ферритного чугунов и из сталей Ст2 и Ст3 составлял 0,019...0,044 мкм на 1000 м пути при скорости скольжения 3,38...4,13 м /с, что за 160 сут. работы в отдельных случаях давало максимальный износ 2,3 мм с каждой стороны. При транспортировании жомовых вод на сахарных заводах средний износ втулок составлял уже 0,23...0,26 мкм на 1000 м пути скольжения.

5. Изнашивание деталей оборудования пищевой промышленности

Особой разновидности коррозионно-механического изнашивания подвержены рабочие органы машин по переработке сырья, содержащего жирные кислоты. К таким машинам относятся, например, шнек-прессы для производства растительного масла, машины для резки, дробления,

размалывания и перемешивания сырья на мясокомбинатах. На эту разновидность изнашивания впервые обратил внимание Г.А. Прейс [3].

Жирные кислоты являются поверхностно-активными веществами из них олеиновая и стеариновая, входящие в большом количестве в состав растительных масел и животных жиров, проявляют высокую активность. Действие поверхностно-активных веществ в свете эффекта Ребиндера рассматривалось в гл. 2. Адсорбируясь и проникая в микро- и субмикротрещины металлической поверхности, в особенности при наличии в ней растягивающих напряжений, поверхностно-активные вещества размягчают поверхность, облегчают пластическое течение в тончайшем поверхностном слое; дело может дойти до сильного разупрочнения и разрывов под действием сил трения. Это дополняется коррозионным действием кислот.

Исследование деталей шнек-прессов, использовавшихся для получения из подсолнечных семян масла, показало, что рабочие поверхности деталей, соприкасающиеся только с мезгой и маслом, становятся полированными, хотя их износ значителен. Шероховатость поверхностей понижается с $R_z = 20...10$ мкм до $R_a = 0{,}32...0{,}16$ мкм. Изнашивание протекает в виде диспергирования.

Эти примеры можно дополнить другими, взяв оборудование торфодобывающей, угольной, химической промышленности и др.

Глава 11 СХВАТЫВАНИЕ И ЗАЕДАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ТРЕНИИ

1. Сущность процесса

Схватывание — явление прочного соединения металлов в результате взаимного трения или совместного деформирования при температуре ниже температуры рекристаллизации. При этом образуются прочные металлические связи в зонах непосредственного контакта поверхностей. В местах схватывания исчезает граница между соприкасающимися телами, происходит сращивание одно- и разноименных металлов.

На образовании прочных металлических связей между двумя заготовками основаны такие технологические процессы, как кузнечно-прессовая сварка, контактная сварка сопротивлением и плакирование методом горячей прокатки. Но в отличие от схватывания эти процессы характеризуются соединением металлов при значительном давлении и при температуре выше температуры рекристаллизации. В этих технологических процессах, как и при спекании изделий, большое значение имеет диффузия.

На явлении схватывания при совместном пластическом деформировании металлов базируются технологические процессы холодной сварки металлов и получение биметаллов методом холодной прокатки. Схватывание между инструментом и обрабатываемым металлом наблюдается при обработке давлением, а при резании оно проявляется в виде наростообразования на резце. Если при технологических процессах соединения металлов методом холодной сварки и плакирования схватывание используется целеустремленно, то при резании, холодной обработке давлением и при трении схватывание является вредным сопутствующим процессом [8].

Единой точки зрения на механизм процесса схватывания пока нет. Остановимся на одной, наиболее правдоподобной гипотезе схватывания. Опыты по трению совершенно чистых металлических поверхностей в вакууме показали, что при относительном движении поверхности повреждаются, и сопротивление их смещению того же порядка, что и сопротивление материалов срезу. Отсюда можно сделать вывод, что для образования прочных связей между металлами в холодном состоянии необходимо отсутствие на соприкасающихся поверхностях всякого рода пленок и загрязнений. Это условие признается в настоящее время обязательным.

Что же представляет собой процесс схватывания в обычных условиях? Если приложить нагрузку к двум соприкасающимся металлическим образцам, чтобы обеспечить между ними достаточную площадь контакта (на расстояниях порядка межатомных), то в результате взаимодействия атомов произойдет схватывание поверхностей, представляющее собой спонтанный процесс, протекающий с выделением энергии. Если у одно-

го и того же металла контактируют два кристаллита с одинаковой ориентацией, т. е. с параллельным расположением кристаллографических плоскостей, то произойдет их простое сращивание в один общий кристаллит. Если же контактируют два кристаллита с различной ориентацией, то между ними образуется переходная зона той же природы, что и межкристаллитная зона в поликристаллах. Для построения переходной зоны используется поверхностная энергия, высвобождающаяся в результате исчезновения контактирующих поверхностей. Если контактируют два разноименных металла, то между ними тоже образуется переходная зона и возникают металлические связи большей или меньшей прочности.

Может ли произойти схватывание между металлами, покрытыми пленками окислов или другими химическими соединениями (сульфидами, хлоридами) и адсорбированными пленками без полной специальной очистки поверхностей? Очевидно, это будет возможно при наличии условий, необходимых для удаления пленок на достаточном числе участков и при сближении поверхностей на этих участках на межатомное расстояние. Такие условия могут быть в результате пластической деформации при действии одной только нормальной нагрузки в зависимости от соотношения механических свойств пленки и металла. Если сопротивление пленки деформированию значительно больше, чем сопротивление металла (твердость пленки выше твердости металла), то при достаточной нагрузке металл пластически деформируется. Пленка при этом не растекается, а разрывается на отдельные части, связанные с металлом, почти не изменяя общую площадь. Происходит выход основного металла в промежутки между частями пленки, и совершается схватывание на чистых вновь образованных поверхностях металла. Если твердость пленки меньше твердости металла, то пленка деформируется вместе с металлом, не разрушаясь, схватывания не возникает. Так как в процессе пластического деформирования материал упрочняется и твердость его повышается, то для условий схватывания важно, чтобы твердость пленки была выше не только начальной твердости металла, но и твердости при той степени пластической деформации, которая необходима для выхода металла к непосредственному контакту чистых поверхностей.

Из сказанного следует, что один и тот же металл, в зависимости от свойств пленок на его поверхности, может обладать способностью к схватыванию или такую способность не проявлять.

На процесс схватывания влияет толщина металлических и оксидных пленок в связи с неизменным присутствием на них адсорбированных пленок из внешней среды. Дело в том, что на разорванных участках толстых пленок, по-видимому, вследствие их большой пористости, загрязнения под нагрузкой остаются почти не выдавливаясь. Загрязнения с тонких пленок стекают и препятствуют схватыванию поверхностей.

Если металлическую поверхность очистить вращающейся стальной щеткой, то вместе с загрязнениями снимается верхний исходный слой металла. Одновременно произойдет окисление металла и наклеп верхних слоев. О степени наклепа можно судить по тому, что у алюминия твердость повышается в 5,6, а у меди — в 3,2 раза. В результате очистки

образуются пленки высокой твердости из наклепанного металла. Наличие такой пленки способствует схватыванию металла при совместном пластическом деформировании образцов при холодной сварке. Такова точка зрения С.Б. Айбиндера на процесс схватывания [1].

Предыдущий анализ показывает, что сваривание металлов может быть не только при повышенных температурах, но и при нормальных, и, что особенно примечательно, независимо от длительности пребывания металла в контакте. С повышением температуры процесс схватывания облегчается.

Благодаря адгезии могут образоваться прочные связи между металлами, металлом и неметаллом и между неметаллами. Адгезия обусловлена межатомными связями или взаимодействием слипшихся поверхностей с тонкими пленками жидкостей, находящихся между ними. Эти связи слабее, чем металлические; они типа ван-дер-ваальсовых. Адгезионное действие при трении аналогично схватыванию.

Прочность схватывания или адгезии двух поверхностей может быть оценена величиной растягивающих напряжений, необходимых для разрушения образовавшихся связей. Эта величина зависит для данной пары трения от площади сцепления. Поскольку между контактируемыми телами действуют силы упругости даже в области пластического течения, то при снятии нагрузки может быть достаточно действия только упругих сил, чтобы разорвать образовавшиеся связи. Подобного самопроизвольного разрушения связей не будет, если общая площадь сцепления превышает некоторый минимум.

Схватывание между металлическими поверхностями при некоторых режимах трения без смазочного материала возникает сравнительно легко. Пластическое деформирование на площадках фактического контакта и внедрение одной поверхности металла в другую создают условия для сдирания окисных и адсорбированных пленок масел, жиров, газов и влаги и образования узлов схватывания. Узел схватывания — это местное соединение поверхностей, образующийся при трении в результате схватывания. Местное соединение поверхностей при трении вследствие адгезии называют узлом адгезии.

Необходимой предпосылкой для образования узла схватывания на поверхностях трения является разрушение смазочной пленки. Оно может произойти под действием высокой температуры при упругой деформации поверхностных слоев, при наличии значительной пластической деформации или при совместном действии повышенной температуры и пластической деформации.

По Ф.П. Боудену характер разрушения узлов схватывания или адгезии можно свести к четырем случаям [2].

1. Прочность связи меньше прочности металлов пары трения. Срез происходит по самому соединению. Количество металла, удаленного с обеих поверхностей, незначительно даже при сравнительно высоком коэффициенте трения.

2. Соединение прочнее, чем один из металлов. Срез происходит в толще менее прочного металла; при этом его частицы будут налипать на

более твердую поверхность. Не исключается, что коэффициент трения будет относительно малым. При некоторой длительности процесса трения на твердой поверхности образуется пленка из более мягкого металла, скольжение становится подобным скольжению одинаковых металлов.

3. Соединение прочнее обоих металлов. Основные разрушения связи приходятся на толщу менее прочного металла, но возможны вырывы частиц и в более прочном металле. Более интенсивное изнашивание мягкого металла может сопровождаться заметным износом твердого металла.

4. Соединение одинаковых металлов. Казалось бы, в этом случае прочность соединения и металла должна быть одинаковой. На самом деле соединение подвергается наклепу, и при перемещении его сопротивление срезу увеличивается. Поэтому срез редко возникает по соединению, а чаще по глубине основной массы металла. Поверхностные повреждения оказываются значительными. Это объясняет, почему скольжение одноименных металлов приводит к значительному износу и увеличивает коэффициент трения. Следует заметить, что одноименность металлов еще не является достаточным признаком для такого заключения. Так, весьма неоднородный по структуре чугун при скольжении по чугуну мало повреждается и имеет невысокий коэффициент трения.

В.Н. Гуляев и И.Н. Лагунцев [6] выдвинули гипотезу для объяснения различной способности металлов к схватыванию. Молекулы водорода, кислорода, азота и некоторые другие двухатомные молекулы, адсорбируясь на металлических поверхностях, переходят в атомарное состояние, благоприятствующее диффузии в металл. Доказано, что азот, углерод и водород могут участвовать в металлической связи и входить в кристаллическую решетку металла, куда также проникает кислород при малом количестве его на поверхности в начальный период окисления. Следовательно, если на поверхности контакта количество адсорбированных атомов будет способно раствориться поверхностными слоями контактирующих деталей, то наступит схватывание. Роль пластического деформирования заключается в разрушении поверхностных окисных пленок и снижении концентрации адсорбированных атомов на поверхности фактического контакта. Так же могут происходить структурные изменения, влияющие на способность к схватыванию. Способность металлов к схватыванию определяется отношением его абсорбционной и адсорбционной способностей.

Производились поиски связи между способностью к схватыванию и свариванию металлов и их взаимной растворимостью. По-видимому, это стимулировалось известным фактом образования задиров поверхностей при трении одноименных металлов.

Опыты показали, что нельзя снижать роль взаимной растворимости металлов при схватывании. В самом деле, взаимно нерастворимые в твердом состоянии металлы не свариваются и не склонны к схватыванию, например, серебро, индий, свинец, висмут. Однако почти нерастворимый в железе кадмий сваривается с ним и, тем не менее, отличается хорошими антифрикционными свойствами. Критерий взаимной растворимости

металлов в твердом состоянии для оценки их антифрикционных свойств является недостаточным не только потому, что известны противоречащие ему факты, но и вследствие того, что в реальных условиях не меньшую роль играют и другие показатели. Высокие антифрикционные свойства некоторых металлов объясняются тем, что они образуют с железом непрочные хрупкие интерметаллические соединения (сурьма, олово). Способность к схватыванию и степень повреждаемости поверхности при схватывании определяется скоростью образования защитных окисных пленок, их износостойкостью и сопротивлением их продавливанию в основной материал. Свариваемость титана со сталью объясняется не только их взаимной растворимостью, но и свойствами окисной пленки.

При изучении схватывания металлов в 1956 г. [3] было установлено условие глубинного вырывания при схватывании. Пусть известно изменение сопротивления материала срезу τ по глубине z от поверхности трения: $\tau = \Phi(z)$. Если градиент механических свойств материала $dt/dz > 0$, то прочность поверхностных слоев меньше, чем нижележащих, и глубинного вырывания при схватывании не будет. Если $dt/dz < 0$ и прочность связи выше прочности основного металла, то при относительном движении поверхностей при схватывании произойдет глубинное вырывание.

Этот критерий в то время давал некоторые основания для создания материалов, которые обеспечивали бы благодаря положительному градиенту механических свойств по глубине чисто внешнее трение без переноса материала с одной поверхности трения на другую. Однако открытие ИП при трении опровергло это положение; оно оказалось в принципе неверным. При ИП поверхностный слой металла настолько разупрочняется, что превращается в квазижидкое тело; при этом происходит перенос материала на твердую стальную поверхность (сжиженная медь переносится на сталь несмотря на положительный градиент механических свойств). Перенос при трении может быть отдельными атомами, их группами, мицеллами и небольшими кусками медной пленки (рис. 11.1).

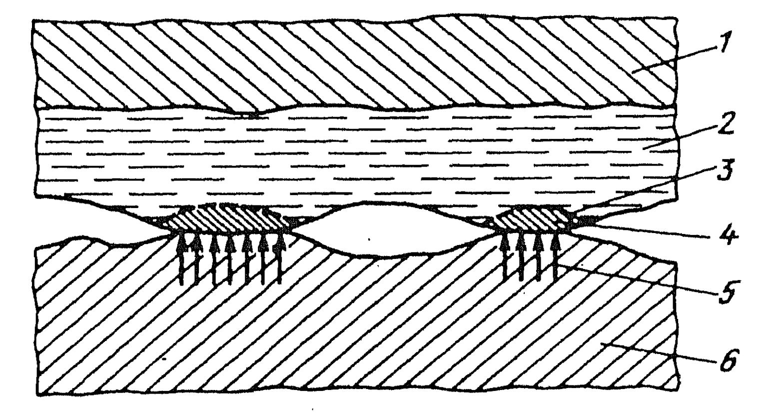


Рис. 11.1. **Участок фактического контакта пары бронза – сталь:**
1 – бронза; *2* – сжиженный слой меди; *3* – место разрыва сжиженного слоя; *4* – участок меди, упрочненный в результате действия адгезионных сил стальной основы; *5* – направление адгезионных сил; *6* – сталь

Существенным является упрочняющее действие твердой стальной поверхности на медную пленку в результате возникновения адгезионных сил. В зоне непосредственного контакта квазижидкая медная пленка как бы упрочняется, и при тангенциальном смещении разрыв получается в глубине медной пленки. Внешнее трение переходит во внутреннее. В дальнейшем будет показано, что этот вид трения выгоднее с точки зрения износостойкости деталей и энергетических потерь (см. часть II).

2. Изнашивание при схватывании

Процесс возникновения и разрушения узлов схватывания видоизменяется в зависимости от конструкции деталей, их материалов и режимов трения. Рассмотрим проявления схватывания и адгезии, наблюдаемые при испытании образцов на машинах трения, и при исследовании технического состояния узлов трения.

1. Вырывы материала в виде микроскопических и субмикроскопических частиц с одной поверхности и перенос их на другую поверхность (рис. 11.2). Площадь частиц мала, масса их может быть до 10^{-10} г. При работе приваренные частицы срабатываются, вырываются и уносятся от зоны трения. Повреждения поверхностей наблюдаются под микроскопом, а мельчайшие частицы могут быть обнаружены лишь авторадиографией. Независимо от частоты образования узлов схватывания интенсивность изнашивания будет мала. Такое проявление схватывания не может вызвать катастрофического разрушения.

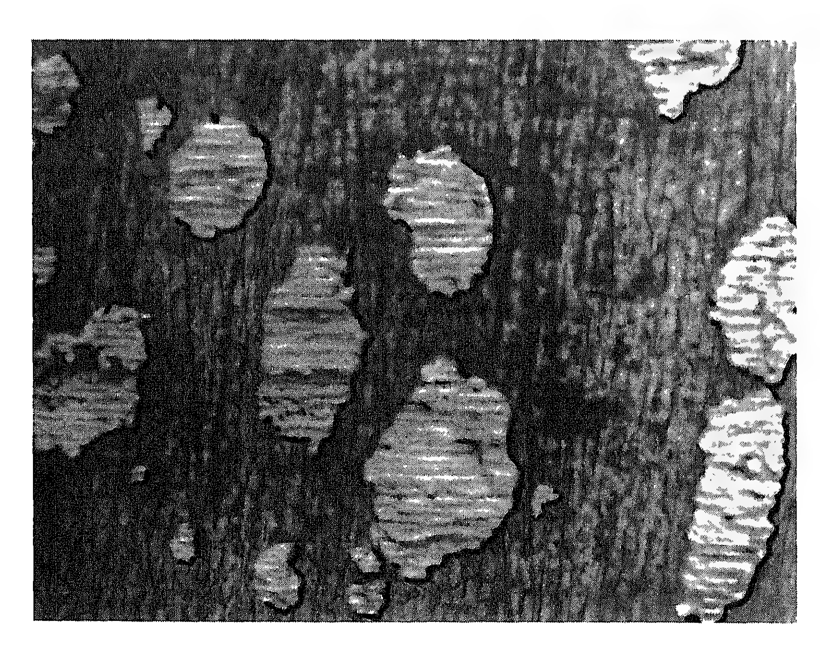


Рис. 11.2. **Поверхность стального шлифованного образца с частицами меди (светлые участки), перенесенными с медного образца при трении в среде глицерина при давлении 10 МПа, ×100**

2. Образование тонкой пленки (налета) мягкого материала на твердой сопряженной поверхности, например, омеднение режущих кромок резца при резании меди и ее сплавов, намазывание бронзы на сталь (на валы, червяки, болты), свинца на сталь, стали или алюминиевого сплава на хромовое покрытие; полимера, резины на вал. Последствия такого схватывания следующие:

может наблюдаться интенсивное изнашивание, например, в случае, когда бронзовая пленка отделяется от стальной детали, уносится из зоны трения и возникает вновь;

при высокой скорости скольжения из-за большого тепловыделения, вызванного значительной силой трения между одноименными металлами, намазывание бронзы может закончиться заеданием;

намазывание вызывает скачок силы трения, не влияя заметно на износ (например, намазывание полиамидов на стальной вал);

намазывание является стадией предкатастрофического повреждения поверхностей трения; тончайший слой стали, намазанный на хромированную поверхность, схватывается со стальной поверхностью трения, и образуются вырывы хромового покрытия и изнашивание его наклепанными частицами хрома; затем происходит обратный перенос хрома на покрытие с образованием новых больших очагов схватывания; таким образом, возникает сложная цепь взаимоперекрывающихся явлений;

намазывание резины на стальную или бронзовую шейку вала обращает как правило, пару трения во фрикционную пару с повреждением резиновой поверхности;

образование тонкого слоя меди на стальной поверхности при ИП не приводит к износу сопряжения и повышению сил трения.

На рис. 11.3 приведен болт шарнирного соединения после работы его с бронзовой втулкой в режиме ИП. Болт работал при малой скорости скольжения с большими давлениями. Смазывающий материал ЦИАТИМ-201. При работе произошло намазывание на болт тонкого слоя меди, выделившейся из бронзы. В таком состоянии болт может работать с сопряженной втулкой без нежелательных последствий.

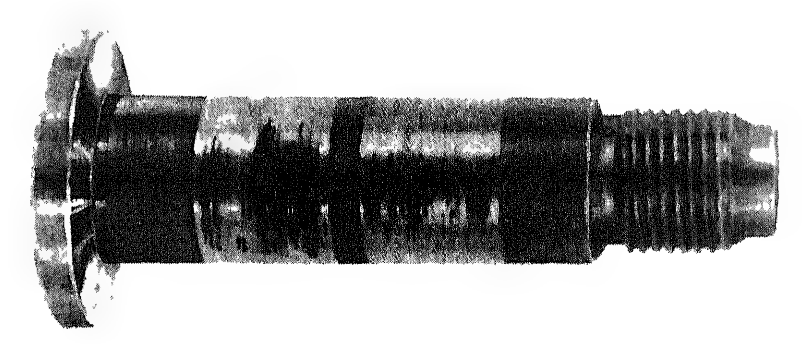


Рис. 11.3. **Болт шарнирного соединения со слоем бронзы на рабочей поверхности**

Катастрофическое изнашивание бронзовой втулки агрегата поршневого двигателя внутреннего сгорания вызвало намазывание тонкого слоя бронзы на стальной валик и привело к наволакиванию толстого слоя бронзы и заклиниванию валика во втулке (рис. 11.4.).

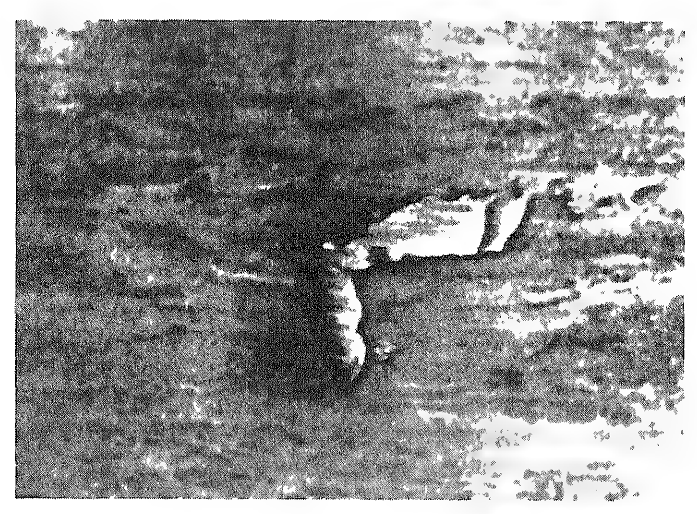


Рис. 11.4. **Поверхность стального валика с наволакиванием слоя бронзы**

3. Перенос твердого материала на мягкую поверхность. Сталь переносится на бронзу, бронза вследствие адгезии переносится на резину или пластик. На более твердой поверхности образуются риски в результате царапающего действия перенесенного металла, находящегося в наклепанном состоянии. Такой вид схватывания приводит к потере работоспособности узла трения, хотя проявляется редко, обычно при чрезмерно высоких давлениях и температурах. На рис. 6.8 показан поврежденный бронзовый золотник керосинового насоса и сопряженная с ним стальная поверхность ротора. При перекосе подшипника по отношению к ротору повысилось местное давление и произошло вырывание частиц стальной поверхности и перенос их на бронзовую поверхность. Такое перенесение частиц вызвало усиленное рискообразование на стальной поверхности ротора. Здесь разрушение поверхности обязано водородному изнашиванию.

4. Вырывание материала с образованием глубоких борозд, уступов и впадин (рис. 11.5). Процесс вырывания сопровождается интенсивным наклепом поверхностных слоев на значительную глубину. При металлографическом исследовании поврежденных участков видна вихреобразная текстура, вытянутость зерен по направлению движения поверхностей.

При больших скоростях скольжения в процессе образования повреждений на поверхностях возникают "белые слои" (рис. 11.6).

Глубинное вырывание поверхностных слоев является катастрофическим явлением; оно приводит к повышению скорости изнашивания в десятки тысяч раз, увеличению сил трения, повреждению поверхностей,

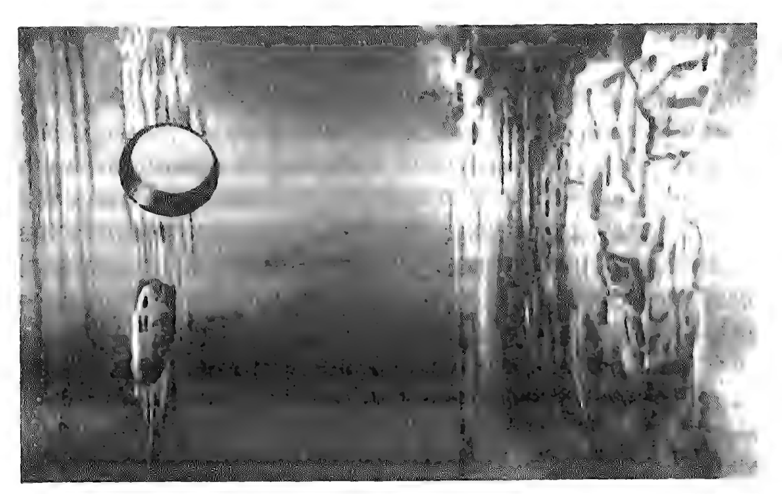


Рис. 11.5. **Внешний вид стального золотника топливного насоса после заклинивания его в стальной втулке**

что снижает сопротивление усталости деталей, а в ряде случаев вызывает их заклинивание и поломку.

Как было показано, схватывание материалов проявляется в самых разнообразных формах. Начинается оно с субмикроскопических повреждений, переходя постепенно к локализованному разрушению поверхност-



Рис. 11.6. **Сечение поврежденной поверхности золотника в результате схватывания. Шлиф ×100**

ного слоя, различимому невооруженным глазом, и к глубинному вырыванию; затем разрушение может приобрести лавинный характер. При эксплуатации машин для качественной оценки степени повреждения поверхностей используют следующие термины.

Натир — участок поверхности трения, отличающийся по цвету от прилегающих участков и испытывающий наибольшее давление. Натир бывает светлым (результат сглаживания микронеровностей поверхности или образования мельчайших рисок в направлении скольжения) и темного цвета (результат местных повышенных температур и образования окисных пленок). Натиры могут образовываться при любом виде изнашивания; вместе с тем они могут стать зонами повреждения от схватывания, если режим трения изменился в неблагоприятную сторону.

Задир — образование в результате схватывания различимой невооруженным глазом борозды с оттеснением материала как в стороны, так и по направлению скольжения. Может образоваться и группа борозд. Применительно к отдельным узлам были попытки дифференцировать задиры по степени повреждения поверхности. Классификация степени повреждения поверхностей зубьев предложена Я.Г. Кистьяном. Исследования противозадирной стойкости металлов изучено в работе [7].

Заедание — наиболее яркая форма проявления схватывания. Образуются широкие и глубокие борозды с неровными краями, иногда слившиеся; присутствуют крупные наросты; возможно оплавление поверхности. Может произойти полное заклинивание деталей.

3. Задиры в узлах машин

С заеданием приходится встречаться в тяжелонагруженных подшипниках скольжения, зубчатых зацеплениях, передающих значительные крутящие моменты, реже в подшипниках качения; в золотниковых парах, шарнирных соединениях, в деталях цилиндро-поршневой группы двигателей, в направляющих станков и других машин, в резьбовых соединениях и т. п. Трудно указать машину, в узлах которой исключалось бы заедание хотя бы из-за нарушения правильных условий эксплуатации.

3.1. Заедание зубчатых и зубчато-винтовых передач

Возможно заедание любых зубчатых и зубчато-винтовых передач. Схема процесса заедания смазанных зубчатых передач такова. При низких скоростях скольжения, свойственных тихоходным передачам, толщина смазочного слоя между поверхностями зубьев в условиях контактно-гидродинамической смазки с увеличением нагрузки неуклонно падает вплоть до перехода к граничной смазке с разрушением пленки вследствие пластической деформации; металлический контакт поверхностей зубьев наступает без заметного повышения температуры. В быстроходных передачах образующаяся теплота не успевает в достаточной мере отво-

диться от поверхности колес до начала следующего контакта. Температура на контакте растет, и после того, как она достигнет критической для данного масла величины, смазочная пленка разрывается. При больших нагрузках, сопровождаемых пластической деформацией рабочей поверхности зубьев, заедание может наступить при температуре поверхности более низкой, чем критическая температура масла.

Заедание цилиндрических зубчатых колес, по некоторым данным, возникает преимущественно на вершинах зубьев ведомого колеса и на сопряженных с ними ножках ведущего колеса. Предполагается, что это вызвано соскабливанием смазочного материала кромкой зуба при входе его в зацепление (в зацепление пары зубьев входит ножка ведущего колеса и вершина зуба ведомого колеса).

Все факторы, способствующие концентрации нагрузки по ширине колес, ухудшают противозадирную стойкость. Начальная шероховатость поверхности зубьев для прирабатываемых колес не является показателем, влияющим на заедание. Обработочные царапины, перпендикулярные направлению скольжения, оказывают противозадирное действие, поэтому зубья, шлифованные методом копирования, более стойки, чем зубья, шлифованные методом обкатки.

У цилиндрических колес при одном и том же диаметре начальной окружности с увеличением модуля возрастает скорость скольжения на входе и на выходе из зацепления, повышается тепловыделение, что приводит к разжижению и утонению смазочной пленки на этих участках. Поэтому в быстроходных редукторных передачах, в том числе судовых турбозубчатых, применяют колеса с мелкими модулями (3...6, изредка 8 мм). Целесообразность использования мелкомодульных колес установлена эмпирически, лишь потом стали применять настолько малые модули, насколько это допустимо по соображениям прочности зубьев на изгиб. Кроме того, стоимость нарезания колес с малым модулем ниже. Повышение коэффициента высоты зуба действует аналогично увеличению модуля. При возрастании угла наклона зубьев косозубых колес повышается плавность работы и снижается динамическая составляющая нагрузки.

При нормальном зацеплении ножка зуба ведущего колеса скользит по головке зуба ведомого колеса, а ножка зуба ведомого колеса скользит по головке зуба ведущего колеса. Вектор скорости скольжения профилей зубьев изменяет направление на полюсной линии, поэтому частицы износа зуба сбрасываются с его профиля по обе стороны от полюсной линии. Путь частицы при удалении из зоны зацепления равен длине дуги профиля головки зуба или длине дуги рабочего участка ножки зуба. При небольшом коэффициенте коррекции, но отличном от нуля, описанная картина сохраняется в том смысле, что вектор скорости скольжения меняет направление на полюсной линии. Так как соотношение длин дуг дополюсного и заполюсного участков изменилось, то в общем путь для большинства частиц износа увеличивается.

При внеполюсном зацеплении, когда зуб одного колеса состоит только из головки, а зуб другого — только из ножки, скорость скольжения по

профилю не меняет своего направления, и частица должна переместиться по всей высоте зуба, прежде чем выйдет из зоны трения. Это зацепление, как показывает опыт эксплуатации, склонно к задирам, и приработка его вызывает большие трудности. Окружная скорость тоже влияет на сопротивление поверхностей заеданию. С увеличением окружной скорости растет и скорость скольжения, смазочная пленка устанавливается большей толщины, но в слое смазочного материала увеличивается тепловыделение, которое способствует уменьшению толщины пленки. Суммарное действие этих двух факторов при достаточном теплоотводе от поверхности колеса приводит к тому, что с увеличением окружной скорости можно допустить большую, чем расчетную, температуру контакта без опасности заедания.

На рис. 11.7 приведены некоторые результаты исследований износостойкости зубчатых колес, выполненные В.А. Гришко с использованием метода меченых атомов: $z_1 = 19$, $z_2 = 52$, $m = 3$, $a = 20°$, степень точности 7. Смазочный материал — масло автотракторное зимнее с температурой на выходе из редуктора около 50°С. На нагрузочных режимах *А* и *Б* на приработке окружная скорость 3 м/с, скорость скольжения в начале зацепления 1,13 м/с; скорость скольжения после приработки 4 м/с. На режиме В окружные скорости соответственно 4,5 и 5,2 м/с. При контактном напряжении в полюсе зацепления $\sigma_к = 900$ МПа при предварительных испытаниях выявлены следы заедания на участках зубьев, соответствующих концам линии зацепления. На режиме А, при котором сразу после приработки был переход к $\sigma_{пов} = 1080$ МПа, возникало прогрессирующее заедание. При режиме Б приложение такой же нагрузки после некоторого времени работы на установившемся режиме прогрессирующее заедание начинается с некоторым запаздыванием. На режиме В (высокие окружные скорости и небольшие нагрузки) заедание неустойчиво; оно сопровождалось резким увеличением износов. Возрастание скорости изнашивания зубчатых колес может служить одним из критериев заедания при непрерывном контроле [5].

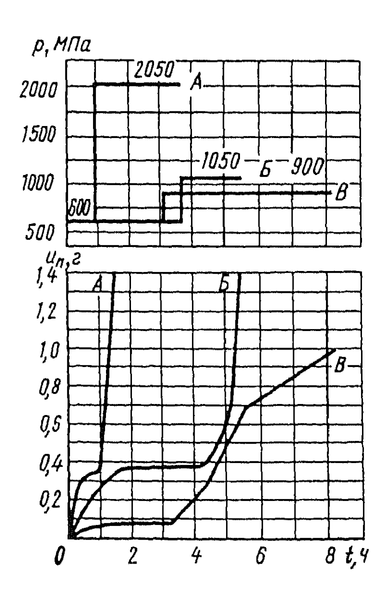


Рис. 11.7. **Кривые износа цилиндрических зубчатых колес**

Из всех передач зацеплением цилиндрические и конические с прямыми, косыми и спиральными зубьями находятся в наиболее благоприятных условиях с точки зрения возможности реализации контактно-гидродинамической смазки, так как отсутствует скольжение вдоль контактных линий. В цилиндрических передачах с внутренним зацеплением и в зацеплении Новикова, где выпуклый профиль контактирует с вогнутым, условия смазывания лучше.

В винтовых передачах со свойственным им начальным точечным контактом и относительной скоростью скольжения, направленной вдоль зуба, грузоподъемность масляной пленки невелика и схватывание является основным видом разрушения рабочих поверхностей.

Гипоидные передачи, получившие широкое применение в задних мостах автомобилей, отличаются наличием участков, где относительное движение зубьев представляет собой почти чистое скольжение вдоль контактных линий. При больших скоростях скольжения они подвержены сильным задирам. Наиболее радикальное средство борьбы с задирами — применение противозадирных смазочных материалов.

В червячном зацеплении смазывание более совершенно, в особенности в глобоидном зацеплении; тем не менее, заедание нередко встречается и здесь, чаще в передаче с цилиндрическим червяком. При бронзовом червячном колесе заедание проявляется не в виде задиров, а в намазывании и повышенном износе. При малых скоростях скольжения, если червячное колесо изготовлено из чугуна, заедание может принять более выраженную форму.

3.2. Задиры в подшипниках качения

Задиры в подшипниках качения возникают в результате скольжения тел качения по дорожкам качения и по бортам колец.

Это может произойти: в подшипниках без сепараторов при большом числе тел качения (большое относительное скольжение между ними при значительной скорости вращающегося кольца может вызвать местный перегрев и потерю смазочной способности в зоне проскальзывания); в конических и сферических роликоподшипниках при недостаточном смазывании и большом давлении ролика на борт кольца (риски располагаются на бортах по циклоидам); в переполненном застывшим смазочным материалом подшипнике в начале его работы (застывший смазочный материал не позволяет телу качения вращаться в ненагруженной зоне, при входе в нагруженную зону оно не может мгновенно приобрести нормальную для него скорость;происходит проскальзывание с возможностью развития задира, в особенности в месте контактирования дорожки качения с кромками роликов); в высокооборотных упорных шарикоподшипниках при легкой нагрузке под действием гироскопического момента шариков (штрихи и риски направлены под углом к направлению качения).

3.3. Задиры поршневых колец, цилиндров и поршней

Задиры поршневых колец, цилиндров и поршней в дизелях вызывают необходимость ремонтных работ и приводят обычно к авариям. Задиры на поршнях имеют вид рисок и борозд на различной высоте и окружности тронка; встречаются круговые задиры, точнее, винтовые, весьма редки задиры на боковых поверхностях головок поршней.

Задиры на рабочей поверхности цилиндров и на поршнях двигателей внутреннего сгорания могут, по мнению Г.И. Михалина, произойти вследствие искажения геометрической формы зеркала цилиндра (в результате недостаточного или резкого охлаждения двигателя, длительной перегрузки или форсированной нагрузки его без достаточного предварительного прогрева, повышения температуры выпускных газов из-за плохой работы топливной аппаратуры); перегрева поршня (вследствие малого зазора в замках газоуплотнительных поршневых колец, закоксовывания, потери кольцами упругости, недостаточного поступления жидкости в головку охлаждаемого поршня); недостаточного смазывания цилиндров или неудовлетворительного качества применяемого смазочного масла; чрезмерных перекосов осей кривошипно-шатунного механизма; малого зазора между тронком и цилиндром или излишне плотной посадки втулки в блок цилиндров; резкого увеличения подачи охлаждающей воды; недостатков конструктивного оформления тронка; поломки поршневых колец; осевого смещения поршневого пальца; неудовлетворительной приработки деталей; значительного нагарообразования [10].

Изнашивание чугунных цилиндровых втулок, поршневых колец и тронков поршней протекает в сложных условиях. Верхние поршневые кольца подвергаются абразивному изнашиванию. Цилиндры на разных участках могут подвергаться абразивному, абразивно-коррозионному изнашиванию или диспергированию. Приработанные поверхности этих деталей обладают высокой износостойкостью; они блестящие, серебристо-серого цвета. Повышенные локальные давления, ухудшение условий смазывания, наличие дефектов конструктивного и технологического характера изменяют нормальный для данных пар режим трения и ускоряют изнашивание. Большое количество продуктов износа усиливает абразивное изнашивание. В результате выкрашиваются более крупные блоки, способные к микрорезанию и значительному царапанию рабочей поверхности цилиндра, что часто приводит к задирам. Особенно сильное абразивное действие оказывают частицы твердой фосфидной эвтектики.

Пластическое деформирование поверхности цилиндра при увеличении сил трения в определенных условиях приводит к образованию белого слоя, который слабо связан с основанием и легко выкрашивается, Частицы белого слоя имеют высокую твердость, могут вызвать задиры поверхности. Образование белого слоя не обязательно должно предшествовать задиру и может в некоторых случаях происходить при самом задире. Форсированная приработка может привести к образованию белого слоя со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Иногда бывает трудно установить причины задира. Этому помогает сопоставление и анализ различных фактов, порой не имеющих непосредственного отношения к задиру. Например, в качестве главных судовых двигателей на серии судов применяют восьмицилиндровые тронковые двухтактные дизели со щелевой продувкой — по два на один гребной вал через редукторный привод; один из дизелей правого, другой левого вращения. Задиры отмечались на правом дизель-агрегате, причем преимущественно на последних цилиндрах. В этих двигателях отрабо-

тавшие газы отводятся в общий коллектор и движутся по направлению к восьмому цилиндру. Последние цилиндры обоих двигателей подвергаются более сильному абразивному действию частиц нагара, занесенных из коллекторов на тронк поршня. Но в правом двигателе поршень на рабочем ходу "привален" к цилиндру на стороне выпускных окон, а на левом двигателе он привален на стороне впускных окон. Поэтому в правом двигателе абразивные частицы прижимаются поршнем к цилиндру с большей силой и на большей части хода, чем на левом двигателе. В этом заключалась причина более частых задиров правых двигателей. Применение бронзовых поясков на поршнях было одним из важных мероприятий по улучшению и предотвращению задиров.

Случаи задиров поршней из алюминиевого сплава и задиров пористохромированного зеркала цилиндра отмечались Б.М. Асташкевичем и Т.В. Лариным в процессе приработки на дизелях тепловозов. Применение пористого хромового покрытия различных видов не привело к устранению образования очагов схватывания. Металлографический анализ поврежденных участков на разных стадиях показал, что задир начинается с переноса алюминиевого сплава с поршня на поверхность хрома. Перенос приводит к зарождению нароста, который, увеличиваясь, скалывается затем с зеркала цилиндра вместе с приварившимися частицами хрома и закрепляется на вязком металле поршня, воздействуя как абразив на хромовое покрытие. Об абразивном действии нетрудно судить по тому обстоятельству, что микротвердость частиц, перенесенных на поршень, содержащих также наклепанный хром, доходила до 120 МПа.

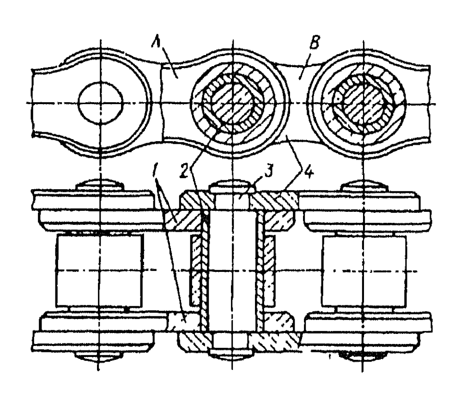


Рис. 11.8. **Втулочно-роликовая цепь с прямыми пластинами**

Схватывание было устранено при толстослойном анодировании поршней с последующей обработкой их дисульфидом молибдена. Толстая анодная пленка может, конечно, разрушить местами защитную окисную пленку на хромовом покрытии, но так как на поверхности поршня покрытие не оголяется, к схватыванию это не приводит. Кроме того, дисульфид молибдена удерживается прочно в течение продолжительного времени на толстой анодной пленке сплава, разделяя поверхности. Возникающие единичные царапины на сопряженных поверхностях заглаживаются к концу приработки.

3.4. Задиры в роликовых цепях

В однорядной втулочно-роликовой цепи с прямыми пластинами (рис. 11.8) внутреннее звено *А* образуется двумя пластинами *1*, в отверстия которых запрессованы втулки *2*. Наружное звено *В* состоит из двух пластин

4, соединенных валиками *3*, которые установлены с натягом. Валики служат осями шарниров цепи, образованных звеньями. При сборке внутренних звеньев искажается цилиндричность отверстия втулки, вследствие чего образуются задиры на валиках и у торцов втулок, ускоряющие изнашивание шарниров.

Развертывание повышенной точности отверстий во втулках после сборки звеньев или выполнение скоса у кромок для компенсации радиальных перемещений центров отверстия при запрессовке валиков являются мерами предупреждения задиров.

3.5. Задиры вкладышей рамовых подшипников

Для пришабривания по шейке вала или для повторной заливки нижние вкладыши рамовых подшипников крупных двигателей выворачивают без подъема коленчатого вала. В случае стальной литой рамы нередко возникают при этой операции задиры в местах прилегания (постели) к стенке стального вкладыша. Разгрузка вкладыша от веса вала посредством гидравлических домкратов, установленных под валом, является радикальным средством защиты от задиров.

3.6. Задиры на направляющих станков

Условия работы направляющих металлорежущих станков не исключают задиров, так как наряду с недостаточной защитой от загрязнений возможны неточности в установке заготовок и нарушение режимов обработки. На круговых направляющих появление задиров обусловлено нарушением режима смазывания; температурными деформациями планшайбы и основания, чрезмерной затяжкой болтов при креплении заготовки к планшайбе; недостаточной работоспособностью подшипников шпиндельного узла, приводящей к увеличению нагрузки на направляющие; низким качеством литья; попаданием песка и стружки.

Технологические методы борьбы со схватыванием разработаны Н.Л. Голего [4]. Заедание в прецизионных парах трения изучено В.Н. Лозовским [9].

3.7. Образование наростов на роликах проходных печей

К своеобразному, трудноустранимому и малоизученному виду повреждений относятся наросты на роликах проходных печей башенного типа для отжига трансформаторной стали (рис. 11. 9). Наросты приводят к возникновению вмятин на полосе стали, в результате искажается профиль полосы и ухудшаются свойства стали, что нередко вынуждает прекратить работу печи.

Вначале наросты едва заметны невооруженным глазом, затем постепенно увеличиваются и достигают значительных размеров:

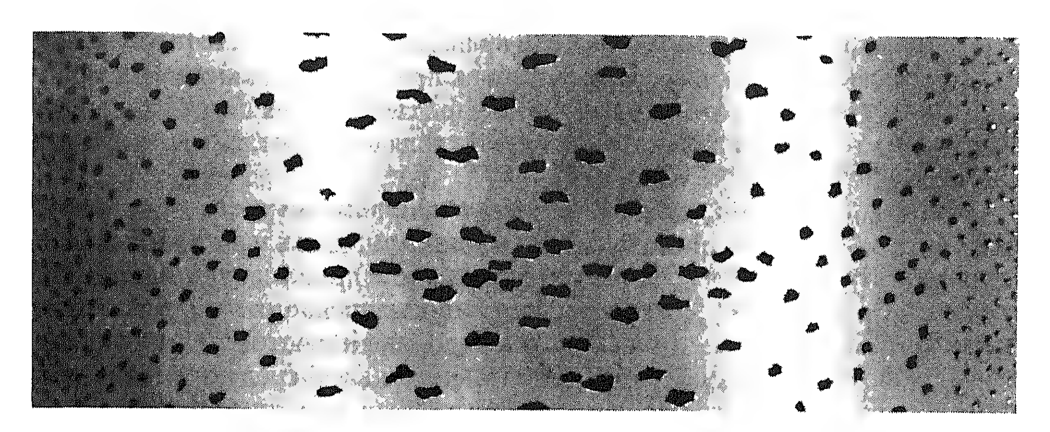


Рис.11.9. **Внешний вид поверхности ролика башенной печи с наростами (темные пятна в виде точек)**

площадь основания около 1 мм², вершина острая. Ролики проходных печей не несут высокой механической нагрузки; они поддерживают листы трансформаторной стали. Анализ показал, что наиболее интенсивно наросты образуются при температуре 850...870°С. Л.И. Гвоздева, В.А. Алейнов и др. изготовили установку, позволившую провести испытания роликов в условиях, идентичных условиям работы роликов печей. Исследования показали, что наибольшая плотность дислокаций под наростами 1,3—10^7 $см^{-2}$, наименьшая (на участках без наростов) — 0,6—10^7 $см^{-2}$. Предполагали, что наросты зарождаются в активных центрах, какими являются места скопления дислокаций. Здесь структура металла искажена, поэтому атомы металла имеют повышенную активность и легко вступают во взаимодействие с находящимися в контакте частицами (например, продуктами износа), что способствует возникновению зародышей схватывания.

Распределение несовершенств структуры (наростов) на поверхности в виде островков обусловлено тем, что фактический контакт поверхностей трения осуществляется не по всей поверхности, а по микровыступам. Под действием прижимающих сил микровыступы деформируются в большей степени, чем другие участки поверхности; это обусловливает более высокую плотность дислокаций в этих местах. С повышением температуры возрастает и степень деформации неровностей, а следовательно, усиливается дефектность структуры в местах фактического контакта, повышается вероятность образования центров схватывания в этих местах.

Наросты имеют чешуйчатое строение в виде наслоений окислов. При исследовании состава наростов выявлены фазы Fe_2O_3, FeO, Fe_3O_4, Fe_3Al, Ni_3Al, Cr_m Se_n, а также сложные соединения типа шпинелей. Наличие окислов в наростах объясняется присутствием в печи окислителя (паров воды). Другие фазы образуются в результате диффузионных процессов, развивающихся в наростах как следствие градиентов концентрации Cr, Ni, Al и др. на границе ролик— нарост. Исследования химического состава наростов показали, что они содержат до 90 % железа, до 4,5 % крем-

ния (в трансформаторной стали 3,5% кремния, а в материале ролика 2%), а также хром, никель (элементы материала роликов), примеси марганца, алюминия. Повышенное содержание в наросте кремния позволило предположить, что первичной основой нароста являются частицы износа трансформаторной стали.

Авторы исследований считают, что увеличение наростов в размерах является результатом припекания частичек (продуктов износа трансформаторной стали) к образовавшемуся наросту и друг к другу. Механизм спекания, по-видимому, аналогичен механизму спекания порошков. Подтверждением этому является слоистое строение наростов. Пара ролик—полоса работает в окислительно-восстановительной среде, что неизбежно приводит к окислительно-восстановительным процессам.

4. Соединение деталей вследствие роста окислов в зазоре

Схватывание рассматривалось нами как процесс, протекающий при взаимном перемещении поверхностей. Однако оно может произойти и при длительном неподвижном контакте сопряженных деталей в окислительной среде (воздухе, водяном паре и т.д.) вследствие сращивания окисных пленок в зазорах. Такое схватывание (следовало бы сказать адгезия) наблюдается в предохранительных клапанах и запорной арматуре в виде "прикипания" тарелки к корпусу или к седлу и в резьбовых соединениях, работающих при повышенной температуре, в виде заедания при их разборке.

Механизм соединения сопряженных металлических тел при окислении следующий. Независимо от точности и плотности взаимного прилегания поверхностей, между ними имеются зазоры, во много раз превосходящие размер молекулы окислителя. Проникая в эти зазоры, молекулы окислителя адсорбируются на окисных пленках, затем вступают в химическое соединение с металлом поверхностных слоев. Образование окисных пленок и встречный их рост завершаются соединением кристаллических решеток пленок на тех или иных участках (рис. 11.10). Число таких участков увеличивается с течением времени. При высоких температурах процесс ускоряется. Для соединения сопряженных металлических деталей, помимо наличия окислительной среды, необходимо, чтобы объем окисной пленки превышал объем металла, перешедшего в окисел.

Н.В. Гуляев провел исследования общего окисного слоя в зазорах на углеродистых сталях и легированных хромом и никелем (Ст2, Ст4, 12Х18Н9Т и 30Х13); температура образования соединения в среде воздуха и пара 400...500°С, время выдержки 200...500 ч; температура образования конденсата в среде 20 и 102°С, время выдержки 920 ч [6].

В результате опытов установлено: а) общий окисный слой имеет высокое сопротивление сжатию: 190...280 МПа на углеродистой стали Ст4 и 500...700 МПа на жаропрочной стали; б) сопротивление отрыву соединений, полученных в воздушной среде, достигает 10...40 МПа, а в паровой среде 30...70 МПа; в конденсате соединения не образовывались; в) появление в углеродистой стали вюстита (при температуре более 570°С)

резко снижает прочность соединения; г) прочность соединения снижается при сопряжении разнородных металлов.

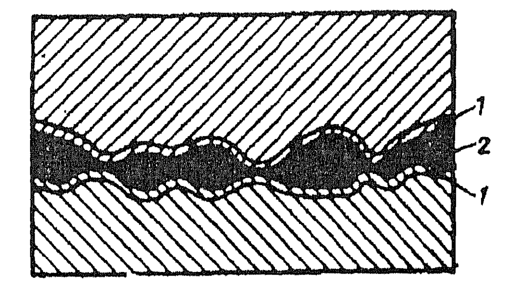


Рис. 11.10. **Схема соединения деталей при образовании общего окисного слоя в зазоре:**
1 – начальные окисные пленки; *2* – окисная соединительная пленка

Разборка резьбовых соединений котлотурбинного, газотурбинного и другого оборудования, работающего при высоких температурах, часто сопровождается изломом болтов и шпилек в результате приложения значительно больших усилий, чем при сборке. Такие же трудности возникают при устранении недостаточной затяжки болтовых соединений под нагрузкой. Для поворота гайки требуется приложить большой крутящий момент, чтобы разрушить окисный слой в зазорах болтовой и гаечной нарезок и слой в микрозазорах между опорным торцом гайки и сопряженной поверхностью. Уже при первом страгивании гайки твердые частицы окислов железа своим абразивным воздействием повреждают поверхность резьбы. При дальнейшем повороте гайки повреждения усиливаются, и может наступить заедание, вероятно, прежде всего в высоконагруженной области гайки, определяемой законом передачи осевого усилия по виткам резьбы.

Легко вывинтить болты и шпильки, изготовленные из материала, коэффициент линейного расширения которого выше, чем у материала гайки. Этим нельзя пользоваться в муфтовых, резьбовых и фланцевых соединениях, где различие коэффициентов линейного расширения материалов болтов и гаек может вызвать потерю плотности.

Окраска крепежных деталей после сборки может предохранить поверхность резьбы от окисления. Некоторые смазочные материалы (дисульфидмолибденовые, графитовые и сернортутные) предохраняют резьбовые соединения от "пригорания" и заедания. Предохраняет от окисления и снижает трение графитомедистый смазочный материал, разработанный Н.В. Гуляевым. Его состав по массе, %: порошковая медь — 25, чешуйчатый графит — 15, глицерин — 60. Графит имеет хорошую смазывающую способность, но после испарения жидкой основы смазочный материал легко удаляется с поверхностей трения. Добавка меди вызвана такими соображениями: медь затрудняет окисление резьбовых поверхностей; мягкие окислы меди снижают среднюю твердость и абразивное действие продуктов окисления в зазорах резьбового соединения; окислы меди, а также соединения их с окислами железа блокируют частицы графита, препятствуя их выпадению. Роль глицерина не вполне ясна; вероятно, глицерин, являясь восстановителем меди, препятствует ее окислению. Чтобы смазочный материал попадал на поверхности трения, зазор по среднему и наружному диаметрам резьбы должен быть не менее максимального зазора по 2-му классу точности (ГОСТ 9150—81).

1. Общие сведения

Фреттинг-коррозия — это процесс разрушения плотно контактирующихся поверхностей пар металл—металл или металл—неметалл в результате малых колебательных относительных перемещений. Для возбуждения фреттинг-коррозии достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язвин и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка. Этому виду изнашивания подвержены не только углеродистые, но и коррозионно-стойкие стали в парах трения сталь—сталь (могут быть как одноименные, так и разноименные), сталь—олово или алюминий, сурьма, а также чугун—бакелит или хром и многие другие пары трения.

Вследствие малой амплитуды перемещения соприкасающихся поверхностей повреждения сосредоточиваются на небольших площадках действительного контакта. Продукты износа не могут выйти из зоны контакта, в результате возникает высокое давление и увеличивается их абразивное действие на основной металл.

При фреттинг-коррозии относительная скорость движения соприкасающихся поверхностей небольшая. Так, в случае гармонических колебаний с амплитудой 0,025 мм и частотой 50 $с^{-1}$ максимальная скорость 7,5, а средняя 2,5 мм/с. В одном из опытов Г.А. Томлинсон наблюдал изнашивание при фреттинг-коррозии при средней относительной скорости поверхностей 0,02 мм/ч.

Если амплитуда колебательного движения большая (около 2,5 мм), то площадь поражения фреттинг-коррозией увеличивается, и картина изнашивания напоминает ту, которая происходит при однонаправленном скольжении. Поэтому можно считать, что амплитуда перемещения поверхностей около 2,5 мм является верхним пределом амплитуды для возбуждения фреттинг-коррозии. Все сказанное относится к несмазанным поверхностям.

Продукты фреттинг-коррозии стальных изделий в атмосфере воздуха имеют цвет от светло-красно-коричневого до темно-коричневого в зависимости от марок материалов, давления, влажности и частоты циклов микросмещений. Состав этих продуктов: основная масса Fe_2O_3, небольшое количество α-железа, могут присутствовать окислы FeO, Fe_3O_4 и гидроокись $Fe_2O_3 \cdot H_2O$, иногда обнаруживаются нитриды. Окислы, нитриды и гидраты образуются при разрушении всех металлов, за исключением платины, продукты износа которой состоят из черного порошка чистой платины.

Фреттинг-коррозия осуществляется также в вакууме, в среде кислорода, азота и гелия. Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии в атмосфере воздуха выше, чем в вакууме и в среде азота, а в кислороде больше, чем в гелии. Если бы интенсивность изнашивания определялась только силами трения, то она была бы выше в вакууме, чем на воздухе,

поскольку в вакууме силы трения значительно больше. С учетом изложенных обстоятельств можно сделать вывод, что существенную роль в процессе фреттинг-коррозии играет окисление поверхностей трения или металлических продуктов разрушения. Вместе с тем на кинетику реакции окисления влияет и механический фактор, о чем свидетельствует хотя бы появление при фреттинг-коррозии окислов кадмия, отличных от ранее известных окислов этого металла. Таким образом, фреттинг-коррозия представляет собой вид разрушения металлов и их сплавов в мало- и неагрессивных коррозионных средах под одновременным воздействием механических и химических факторов.

Язвины и продукты коррозии на сопряженных поверхностях валов и напрессованных на них дисков, колес, муфт и колец подшипников качения, на осях и ступицах колес подвижного состава железных дорог, на запрессованных в картерах вкладышах подшипников, на пригнанных поверхностях шпонок и их пазов, на центрирующих поверхностях шлицевых соединений, на опорах силоизмерительных устройств, на опорных поверхностях пружин, на затянутых стыках, в заклепочных соединениях между листами, на заклепках и в отверстиях, на болтах и т. п. — результат проявления фреттинг-коррозии (рис. 12.1.). Она возникает на образцах в местах контакта с цанговыми зажимами машин для испытания на усталость. Фреттинг-коррозия наблюдается в проволочных канатах, электровыключателях, рубильниках и штепсельных разъемах (рис. 12.2.). Продукты фреттинг-коррозии накапливаются в виде порошков, содержащих металлические частицы. Они образуются в результате трения алюминиевого контейнера при его перевозке о металлические части судна и являются взрывоопасными. В случае выпадения порошков износа из зоны трения происходит ослабление посадок с натягом.

Необходимые для протекания этого процесса относительные микросмещения сопряженных поверхностей совершаются вследствие деформации деталей под нагрузкой и вибрации их, а также колебаний, происходящих в упругих системах. Сказанное поясним на ряде примеров.

Пусть напрессованное на ось ходовое колесо (рис. 12.3) обладает осевой симметрией. Давления от посадки с натягом распределены равномерно по окружности. Приложение силы Q изменяет картину — давление становится неравномерным: в точке *B* выше, чем в точке *A*. При вращении колеса волна смятия перемещается по окружности с угловой скоростью. На посадочной поверхности имеют место как радиальные, так и тангенциальные, а также осевые перемещения. Аналогично протекает явление в поперечных сечениях вала и ступицы зубчатого колеса под действием окружного и распорного усилий.

В рассмотренном примере действие изгибающего момента не было принято во внимание. Однако влияние его может быть значительным. Обратимся к рис. 12.4. Волокно *AB* находится в растянутой зоне, волокно *CO* — в сжатой. При переходе из одной зоны в другую волокно в какой-то мере изменяет свою длину, встречая противодействие со стороны осевых сил трения. Для развития фреттинг-коррозии имеют значение не только микроперемещения, но и силы трения на контактирующихся повер-

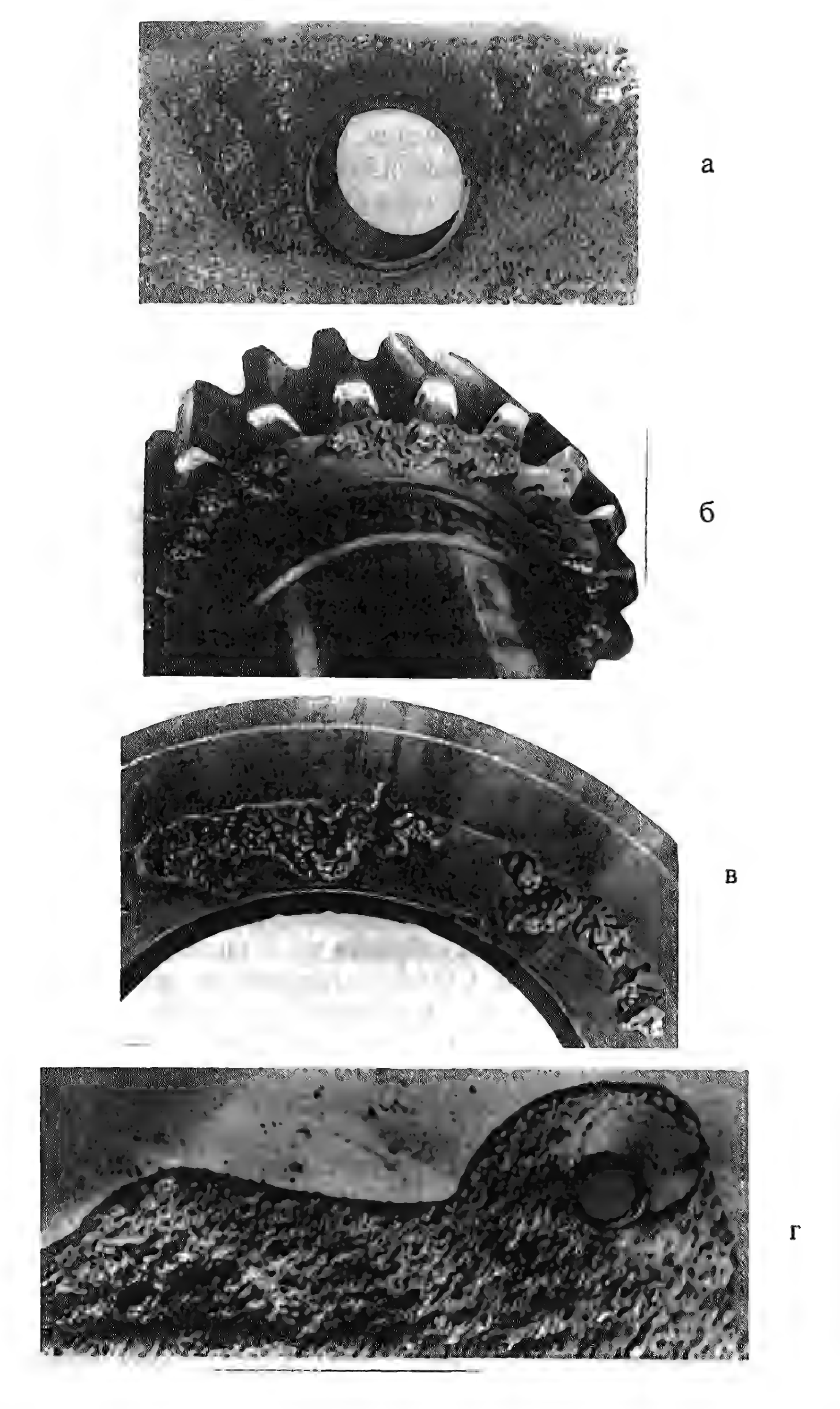


Рис. 12.1. **Повреждения в результате фреттинг-коррозии фланца корпуса компрессора (*а*), шестерни (*б*), шайбы (*в*) и ленты зализа самолета (*г*)**

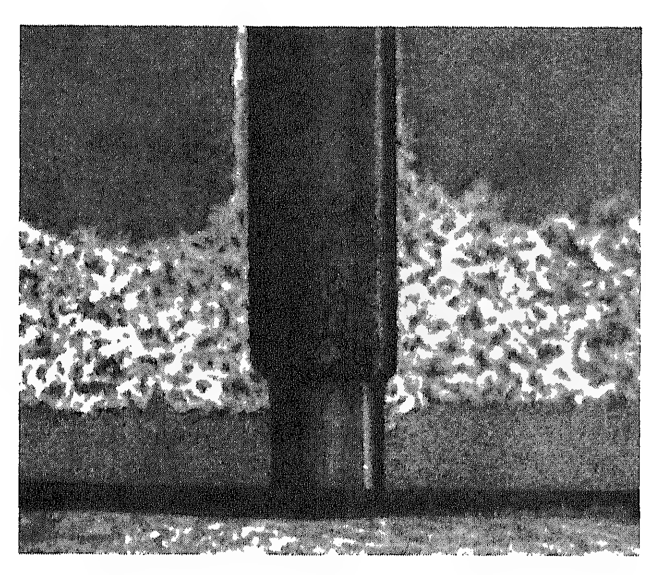


Рис. 12.2. **Штепсельный разъем электрической проводки**

хностях. В данном случае эти силы, как нетрудно видеть, являются знакопеременными.

Всякому нагружению вала крутящим моментом $M_к$ и колебанию его значения соответствует некоторое относительное перемещение вала в местах сопряжения с зубчатыми колесами, муфтами и другими деталями, участвующими в передаче, либо восприятии момента. Это происходит независимо от того, применена ли для соединения этих деталей посадка с натягом или использованы шпонки в сочетании с посадками с натягом либо переходными. Шпонки под действием нагрузки сминаются и перекашиваются в пазах, которые тоже подвергаются смятию; в итоге посадочные места вала и детали взаимно смещаются. В случае посадки с натягом крутящий момент M (рис. 12.5) подводится к шестерне. На протяжении ее длины момент, скручивающий вал, уменьшается от M в сечении I—I до нуля в сечении II—II в соответствии с законом изменения сил трения, который, правда, нам неизвестен. На участке dx вал закрутится на некоторый угол $\alpha\psi$, прямо пропорционально моменту M, между тем как

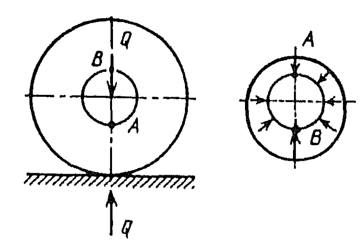


Рис. 12.3. **Схема нагружения ходового колеса и график суммарного радиального давления на вал от посадки с натягом и приложенной поперечной силы**

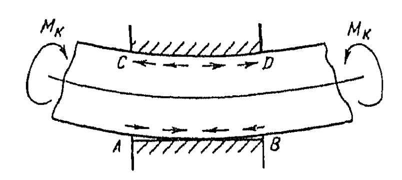


Рис. 12.4. **Схема возникновения осевых сил трения в зоне посадки изгибаемого вала**

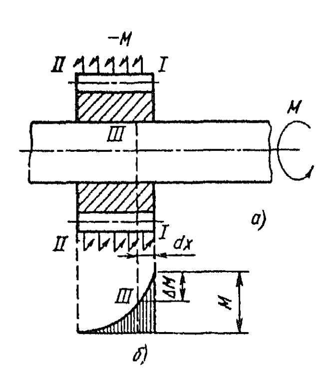


Рис. 12.5. **Схема взаимодействия между валом и шестерней при передаче крутящего момента посредством сил трения:**
а – схема нагружения; *б* – эпюра крутящих моментов

на шестерню на том же участке действуют момент сил трения ΔM, элементарное окружное усилие на зубе ΔP, радиальная реакция со стороны вала и система сил упругости по сечению *III—III*. Поскольку силовые воздействия и жесткость шестерни вала различны, то, вообще говоря, углы их скручивания на участке dx будут разными.

Аналогичное явление должно быть и на некотором участке вала со стороны левого торца шестерни.

Повреждения поверхностей вследствие фреттинг-коррозии служат концентраторами напряжений и снижают предел выносливости. Более сильное действие оказывает электроэрозия: образуются вакантные (не занятые атомами) места в кристаллической решетке в результате термотоков, возникающих при неравномерном распределении температур в зоне неметаллического контакта трущихся металлов [2]. Снижение сопротивления усталости от действия этих факторов колеблется в широких пределах (10...60%). Иногда усталостные трещины из-за фреттинг-коррозии появляются на валах под напрессованными деталями в местах, расположенных вдали от расчетных опасных сечений. Автомобильная фирма "Рольс-Ройс" (Англия) около 60 лет назад столкнулась с фактами коррозионных повреждений и последующих поломок листов рессор автомобилей. Предполагая вначале, что коррозия является следствием проникновения влаги между листами, фирма тщательно обработала рабочие поверхности листов. Однако корродирование и разрушение продолжалось. Так и не установив причин этого явления, фирма вышла из создавшегося положения, введя кадмиевое покрытие листов. Фактически здесь имела место фреттинг-коррозия, которая в то время не была еще широко известна как особое явление.

Контактирующиеся поверхности могут повредиться вследствие фреттинг-коррозии и во время бездействия машины, от вибрации, возбуждаемой работающими механизмами и передаваемой через пол цеха, набор корпуса судна, фюзеляж самолета и т.д. Подобное явление возможно и при перевозках машин.

Поучительный случай фреттинг-коррозии в сочетании со схватыванием наблюдался в старой конструкции конического сопряжения воздушного винта с валом, приводимым в движение поршневым двигателем. Винт, обладая большим моментом инерции, вращался равномерно. Вал под действием момента, изменяющегося в соответствии с тангенциальным усилием, вращался с переменной угловой скоростью, что вызывало относительное смещение вала и втулки винта. Такой же эффект оказывал изгиб носка вала. Дополнительно влияли крутильные колебания вала и вибрации лопастей.

Втулка крепилась к винту на конусе с одной или двумя шпонками. Хотя втулка притиралась по конусу вала и применялись разделяющие прослойки из графитных, ртутных и других мазей, случаи "сваривания" наблюдались очень часто. Они были устранены только радикальным изменением конструкции. Одно изменение, получившее большое распространение, заключалось в применении шлицевого цилиндрического соединения с двумя центрирующими (передним и задним) разрезными бронзовыми конусами.

2. Закономерности фреттинг-коррозии

2.1. Влияние амплитуды

Исследования влияния амплитуды колебания (проскальзывания) поверхностей на степень повреждения металлов при фреттинг-коррозии, проведенные И.М. Фенгом, Р.Б. Уотерхаузом и др., показали, что имеется примерно линейная зависимость потери массы металла от амплитуды [3]. Результаты исследования В.Д. Шипилова, И.В. Васильева и др. на стойкость различных материалов к фреттинг-коррозии при разных амплитудах колебаний приведены в табл. 12.1. Испытания проводили при частоте 1500 $мин^{-1}$, контактном давлении 12,5 МПа, без смазочного материала.

Таблица 12.1

Марка материала неподвижного образца	Потеря массы неподвижного образца, мг, при амплитуде колебаний, мм			
	0,03	0,08	0,15	0,3
Сталь 20	1	1,25	2,5	12,7
30ХГСА	0,5	1	1,7	9,0
12Х2Н4МА	1,8	2,1	2,0	9,1
Д16	0,4	1,4	3,5	7,7

Примечание. Материал подвижного образца — сталь 30ХГСА.

Оказалось, что при переходе к амплитуде 0,3 мм износостойкость сталей резко уменьшается и приближается к линейной зависимости.

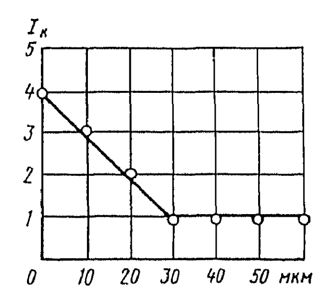


Рис. 12.6. **Зависимость интенсивности Iк фреттинг-коррозионных повреждений (в баллах) на осях под напрессованными обоймами роликовых подшипников от натяга**

2.2. Влияние давления

Повышение контактного давления при фреттинг-коррозии приводит к увеличению повреждений. Имеются данные, что между скоростью изнашивания и нагрузкой существует прямая пропорциональная зависимость. В табл. 12.2

Таблица 12.2

Марка материала неподвижного образца	Потеря массы неподвижного образца, мг, при нагрузке, кН			
	0,5	1	1,5	2
Сталь 20	7,5	9,4	12,5	16,5
30ХГСА	14,2	14,8	15,1	15,5
12Х2Н4МА	10,2	11,4	14,3	16,0
Д16	7,8	12,9	14,9	25,0

Примечание. Материал подвижного образца — сталь 30ХГСА.

приведены данные В.Д. Шипилова, И. В. Васильева и др. по зависимости износа образцов от нагрузки.

В реальных узлах трения повышение давления может приводить к уменьшению проскальзывания, например в прессовом соединении вала и втулки. Тогда интенсивность изнашивания поверхностей при фреттинг-коррозии уменьшается. Исследования Б. А. Генича и др. показали, что при рабочей шейке вала диаметром 75 мм и базе испытаний 10^7 циклов и разных натягах роликового подшипника повреждения прекращались при натягах 30 мкм и более. Нагрузка при испытаниях составляла 12 кН (рис. 12.6).

Таким образом, повышение натяга может в значительной степени уменьшить повреждения от фреттинг-коррозии, но не исключает неблагоприятного влияния фреттинга на сопротивление усталости [2].

2.3. Влияние среды

Представляет интерес установить действие влаги воздуха на изнашивание при фреттинг-коррозии. К.Н. Райт испытал стальной образец при работе с хромированным образцом в среде сухого воздуха и воздуха влажностью 45 и 100%. Условия испытаний: 50 тыс. циклов, амплитуда 0,025 мм, давление 6,6 МПа. Результаты испытаний приведены на рис. 12.7.

В сухом воздухе изнашивание намного интенсивнее, чем при влажном. Наличие паров воды снижает интенсивность фреттинг-коррозии. Можно предполагать, что в процессе фреттинг-коррозии при влажном воздухе образуется диффузионно-способный водород, который может быть восстановителем и уменьшать количество продуктов коррозии. Вероятно, водород ответствен за охрупчивание прилегающих слоев материала к кавернам и образование трещины. Однако установлено, что во влажном воздухе сопротивление усталости при фреттинг-коррозии намного меньше, чем в сухом. Общепризнанного мнения влияния влаж-ности на интенсивность фреттинг-коррозии нет [2].

В жидкой фазе интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии намного ниже. Даже в растворе едкого натра, не говоря уже о дистиллированной воде, потери массы материала при фреттинг-коррозии были в несколько раз меньше, чем в воздушной среде. Уменьшению интенсив-

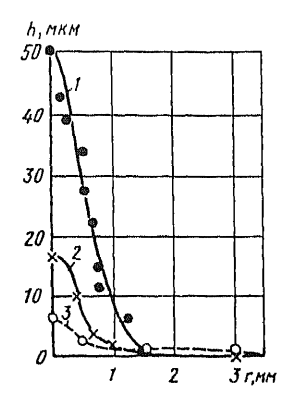


Рис. 12.7. **Влияние относительной влажности воздуха на повреждение поверхности стального образца в результате фреттинг-коррозии (*h* — глубина, r — радиус каверн):**
1 — нулевая влажность; 2 — влажность 45 %; *3* — влажность 100 %

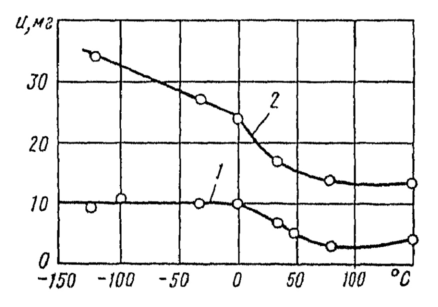


Рис. 12.8. **Зависимость потери массы образцов из малоуглеродистой стали при фреттинг-коррозии от температуры испытания (давление 37 МПа; амплитуда проскальзывания 0,091 мм; частота 540 мин$^{-1}$) при продолжительности испытания:**
1 — 67 800 циклов (2,1 ч); *2* — 457 800 циклов (14,1 ч)

ности разрушения способствуют гидратация окислов и вымывание жидкостями продуктов разрушения из зон контакта [2].

Наблюдения показали, что зимой повреждения от фреттинг-коррозии больше, чем летом. Это относится и к бринеллированию. Влияние температуры на потерю массы образца можно видеть из графика, представленного на рис. 12.8. Как видно, повышение температуры приводит к уменьшению износа от фреттинг-коррозии (испытания проводились без применения смазочного материала в условиях сухого воздуха).

Имеется ли местный нагрев образцов при испытании на фреттинг-коррозию, вопрос спорный. Одни утверждают, что разогрева не может быть, так как скорости скольжения малы, другие говорят, что разогрев может быть до температуры 700°С. По нашему мнению, нагрев может быть значительным, так как в зоне контакта можно наблюдать структурные изменения стали. Повышение температуры в зоне контакта подтверждают результаты исследований, приведенные в работе [1].

3. Механизм фреттинг-коррозии

Рассмотрим один из случаев повреждения фланца корпуса агрегата, наглядно иллюстрирующий механизм фреттинг-коррозии. При ремонте авиационного двигателя было обнаружено значительное развитие процесса фреттинг-коррозии на фланце агрегата двигателя: на торце фланца было заметно вспучивание материала (рис. 12.9). Повреждения по плоскости фланца располагались вблизи шпилек и характеризовались большой пластической деформацией. Материал фланца в местах повреждения находился как бы в расплавленном состоянии и был покрыт темной окисной пленкой.

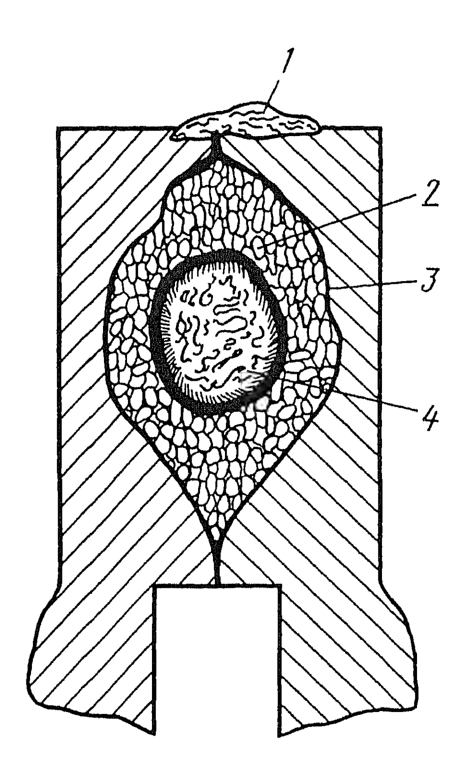


Рис. 12.9. **Фланец агрегата авиадвигателя:**
1 – вспучивание материала на торце фланца; *2* – окислы; *3* – язвины; *4* – шарик внутри язвины

В одном из повреждений находилось металлическое включение в форме шарика диаметром приблизительно 2 мм. Металлографический анализ показал, что материал шарика отличается от материала фланца; он обладает значительно большей твердостью и не травится обычными травителями для черных сплавов. Исследование шлифа под микроскопом свидетельствовало о большой пластической деформации материала шарика. В некоторых местах в сечении шарика были обнаружены окислы, подвергнутые также большой деформации в процессе течения основного материала шарика.

Возникает вопрос, как образовался металлический шарик в месте повреждений и почему его материал отличен от материала фланца. Не касаясь сложных физико-химических процессов, происходящих в зоне контакта и приводящих к образованию закалочных структур, укажем, что в процессе работы на фланце появилась трещина, которая привела к выкрашиванию кусочка материала фланца. Этот кусочек под действием вибрации поворачивался и обтачивался твердыми окислами — продуктами износа. Наличие высоких температур, громадных давлений и пластических деформаций привело к изменению структуры материала шарика.

При фреттинг-коррозии протекают следующие процессы. Под действием сил трения кристаллическая решетка поверхностных слоев при циклических тангенциальных смещениях расшатывается и разрушается. При этом происходит отрыв частиц металла, размеры которых сопоставимы с атомными. Процесс разрушения представляет собой диспергирование поверхности без удаления продуктов износа. Оторвавшиеся частицы металла подвергаются быстрому окислению. Дополнительным источником повреждения поверхностей может явиться возникающее местами схватывание сопряженных металлов. Цепи сцепившихся атомов вначале искажаются при скольжении, а затем разрываются, что приводит к отрыву отдельных атомов от кристаллической решетки и может служить источником зарождения усталостных трещин.

В зависимости от условия фреттинг-коррозии непосредственному разрушению поверхности может предшествовать ее окисление и образование на ней химических соединений в результате повышенной активности атомов пластически деформируемой кристаллической решетки. Разрушение окисных пленок сопровождается схватыванием металлов. По другому варианту упрощенная схема процесса в начальной фазе такова:

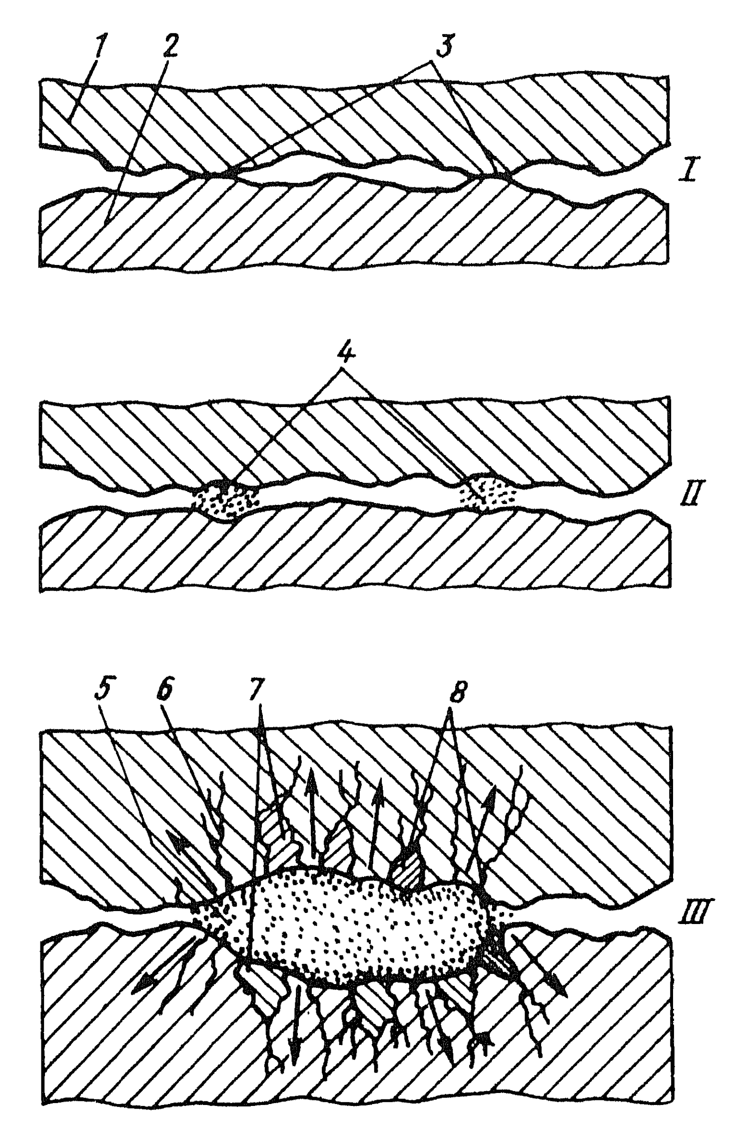


Рис. 12.10. **Механизм изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии:** *1, 2* — контактирующие детали; *3* — точки контакта поверхностей; *4* — мелкие зарождающиеся каверны; *5* — общая большая каверна;. *6* — трещины; 7 — отколовшиеся объемы металла; *8* — отколовшиеся частицы с твердой структурой

перемещение и деформация поверхностей под действием переменных касательных напряжений — коррозия — разрушение окисных и других пленок — обнажение чистого металла и местами схватывание — разрушение очагов схватывания и адсорбция кислорода на обнаженных участках.

Образование окисных пленок на металлической поверхности или продуктов износа в виде окислов изменяет характер протекания процесса, который начинает определяться не только физико-химическими свойствами материалов пары трения в исходном состоянии, но и природой окислов и других образовавшихся химических соединений. Окислению металла сопутствует увеличение объема. При наличии в сопряжении замкнутых контуров (например, в цилиндрических сопряжениях) это приводит к местному повышению давления, что способствует повышению интенсивности изнашивания и возникновению питтингов. Окислы оказывают абразивное действие, которое зависит от прочности сцепления окисных пленок с основным металлом, твердости окислов и размеров их частиц в продуктах износа. Твердость окислов металлов, как правило, больше твердости чистых металлов (см. рис. 7.1).

Механизм изнашивания при фреттинг-коррозии в упрощенном виде представлен на рис. 12.10. Первоначальное контактирование деталей происходит в отдельных точках поверхности *I*. При вибрации окисные пленки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие каверны, заполненные окисными пленками (*II*), которые постепенно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую каверну (*III*). В ней повышается давление окисленных частиц металла, образуются трещины. Некоторые трещины сливаются, и происходит откалывание отдельных объемов металла. Частицы окислов производят абразивное воздействие. В результате действия повышенного давления и сил трения частиц окислов повышается температура, и происходит образование белых твердых нетравящихся структур в отколовшихся частицах и на поверхности каверн.

Твердость Al_2O_3 превосходит твердость азотированной стали. Это объясняет странный на первый взгляд факт разрушения при фреттинг-коррозии сверхтвердых сплавов и сильного разрушения закаленной хромистой стали при трении о них алюминия. Напротив, хромистая сталь при трении о цинк и медь, т.е. металлов с большей, чем у алюминия, твердостью, повреждается меньше вследствие малой твердости окислов цинка и меди. Вместе с тем медь изнашивается значительно медленнее цинка не столько в результате большей твердости, сколько вследствие того, что окисные пленки меди прочно сцепляются с основой и образуют плотный слой, защищающий основной металл. Внедрение твердых окислов олова и алюминия в мягкие металлы может значительно уменьшить их дальнейший износ. Крупный размер частиц окислов способствует повышению интенсивности изнашивания. Так, в паре алюминий — закаленная хромистая сталь, где сталь сильно изнашивается, размер частиц корунда доходит до 10 мкм.

Можно было бы полагать, что свободный графит в серых чугунах, контактирующихся без смазочного материала, должен снизить скорость изнашивания при фреттинг-коррозии. Опыты этого не подтверждают; по-видимому, графит не обеспечивает эффективного смазывания в этих условиях, а структуру ослабляет. Перлитные чугуны в контакте друг с другом менее подвержены повреждению, чем ферритно-перлитные. Большая твердость является благоприятным фактором. Фосфидная эвтектика упрочняет ферритно-перлитные чугуны.

При фреттинг-коррозии возможно образование и белых слоев в результате диффузии азота или углерода из продуктов разложения масла. В результате схватывания и пластической деформации могут образовываться наплывы материала.

С увеличением давления, а в особенности амплитуды относительных смещений, скорость изнашивания при фреттинг-коррозии возрастает. Этот рост при повышении давления обусловлен увеличением площади контакта, поражаемой коррозией. Повышение частоты перемещений ускоряет изнашивание, но, начиная с некоторой частоты, снижается активность факторов, протекающих во времени (окислительные процессы, наклеп и др.), и рост скорости изнашивания уменьшается.

4. Методы борьбы с фреттинг-коррозией

Как и при других видах изнашивания, нет универсальных средств борьбы с фреттинг-коррозией. Если исходить из того, что взаимное микросмещение поверхностей не может быть исключено вследствие упругости материала, то для борьбы с фреттинг-коррозией следует:

а) уменьшить микросмещения; б) снизить силы трения; в) сосредоточить скольжение в промежуточной среде.

Уменьшить относительное микросмещение можно путем придания деталям соответствующих конфигураций или посредством повышения силы трения. Что касается конфигурации деталей, то общеизвестно, что применение разгружающих выточек в ступицах и двойных конических ступиц взамен цилиндрических повышает предел выносливости валов и осей. Эти мероприятия уменьшают не только теоретический коэффициент концентрации напряжений, но и проскальзывание, что, например, нетрудно уяснить, руководствуясь рассуждениями, примененными к схеме на рис. 12.5. Конструктивные методы борьбы с фреттинг-коррозией можно найти в работе [2].

Силы трения можно увеличить, повысив давление путем уменьшения площади соприкасания деталей или повысив коэффициент трения за счет увеличения шероховатости поверхностей. Повышение давления может быть действенным, если проскальзывание поверхностей значительно снизится и будет скорее субмикроскопического, нежели микроскопического характера; в противном случае результаты будут прямо противоположными ожидаемым. Шероховатость поверхностей может длительно влиять на коэффициент трения, если один из элементов пары не является металлом. Другой метод увеличения силы трения состоит в нанесении на

поверхность электролитического слоя меди, олова, кадмия, серебра или золота. Сила трения возрастает за счет повышения фактической площади контакта сопрягаемых деталей. Известно успешное прекращение фреттинг-коррозии между литым алюминиевым картером и корпусом подшипника с помощью лужения. Кадмирование вкладышей, болтов и других деталей для защиты от коррозии и фреттинг-коррозии широко распространено в авиационной и автомобильной промышленности. Однако при значительных микросмещениях эти покрытия сами подвергаются фреттинг-коррозии и быстро изнашиваются.

Если исключить вибрацию невозможно, то напрашиваются пути ослабления повреждения поверхностей в виде снижения силы трения или перенесения скольжения в промежуточную среду. Для снижения удельной силы трения достаточно понизить давление или уменьшить коэффициент трения. В условиях фреттинг-коррозии обычные смазочные материалы не влияют на коэффициент трения, так как граничная пленка в процессе работы не пополняется и быстро разрушается. Молибденит в виде порошка или пасты уменьшает повреждения, но поскольку мнения на этот счет противоречивы, то, по-видимому, он не является универсальным средством. Однако в опытах В.К. Баттена над моделью соединения гребного вала с коническим хвостовиком (средний натяг 0,5 мм) при знакопеременных изгибе и кручении и числе циклов перемен напряжений 10 млн. с различными покрытиями конуса наилучшие результаты получены при использовании молибденитовой пасты, нанесенной на подогретый конус и остывавшей в течение 30 мин перед сборкой.

Аналогично действуют свинцовые белила или их смесь с MoS_2. Фосфатированная поверхность, обработанная водной эмульсией масла или покрытая парафином, уменьшает силы трения. В эмульсию входят полярно активные вещества; сила трения уменьшается, потому что на пористой поверхности покрытия хорошо удерживается двухкомпонентная смазочная пленка, состоящая из молекул сильной и слабой полярности, молекул воды в растворе смазочного материала. Фосфатированную поверхность также целесообразно покрывать парафином.

Свинцовые и индиевые покрытия при малом сопротивлении сдвигу играют роль твердых смазочных материалов. Хотя сила трения при этом и уменьшается, основное назначение покрытий состоит в перенесении процесса смещений во внутрь покрытия. Все покрытия срабатываются, большая или меньшая их эффективность определяется сроком службы.

Хорошую сопротивляемость фреттинг-коррозии оказывают пары сталь — ПТФЭ или полиамиды, полихлорвинил. Действенным средством могут стать резиновые прокладки.

Наконец, уменьшить повреждение от фреттинг-коррозии можно, повышая твердость одной детали. При увеличении твердости стали уменьшается взаимное внедрение деталей, что снижает интенсивность изнашивания; кроме того, продукты износа меньше по размерам, и их абразивное действие слабее. Закалка и азотирование полезны; хромирование не предотвращает и, вероятно, не уменьшает повреждения из-за высокой твердости окисла хрома.

1. Усталостное изнашивание металлического антифрикционного слоя подшипников скольжения

Впервые (в 1918 г.) такое повреждение было отмечено на баббитовых шатунных подшипниках V-образных авиационных двигателей в виде трещин неизвестной тогда природы. Как серьезная проблема вопрос о сопротивлении усталости подшипниковых сплавов возник в начале 30-х гг. в связи с эксплуатацией автомобильных дизелей, наметившимся прогрессом в производстве авиационных двигателей и быстрым развитием дизелестроения. Рост скоростей скольжения на шейках коленчатых валов и нагрузок на подшипники потребовал изыскания и применения новых материалов повышенной прочности.

Однако и для современной практики сохранилась проблема повышения долговечности подшипников по усталостным разрушениям, на которые падает наибольший процент выхода их из строя.

Усталостное изнашивание антифрикционного слоя происходит в подшипниках, подвергавшихся длительному нагружению переменными по направлению и величине усилиями. Принципиально для этого достаточно переменности одного из факторов. Наличие жидкостной смазки не служит помехой процессу. Усталостные трещины берут начало на поверхности трения и входят, сужаясь, в глубь слоя. Развиваясь по длине, мелкие трещины образуют сетку на отдельных ограниченных или больших участках поверхности. Раскрытие трещин происходит под действием пульсирующего давления смазочного масла. На более поздней фазе трещина, достигнув основания антифрикционного слоя, изменяет свое направление, распространяясь по стыку между слоем и основанием, в результате отдельные участки поверхностного слоя обособляются от остального слоя, а затем выкрашиваются. Большую роль в отделении частиц, вероятно, играет смазочный материал, который, проникнув в трещину, как бы подрывает металл над ней. Иногда трещина не доходит до стыка и продвигается вблизи него и параллельно ему. Выкрашивание крупных кусков слоя может сопровождаться поверхностными язвинами.

На рис. 13.1 показана поверхность подшипника авиадвигателя, залитого свинцовой бронзой с усталостными повреждениями в виде сетки трещин [1].

Теория сопротивления усталости подшипниковых сплавов разработана слабо. Высказываются сомнения в возможности усталостного разрушения при пульсирующем цикле сжатия, поскольку разрушение непосредственно под действием сжимающих напряжений противоречит нашим представлениям. Однако оно может быть обусловлено касательными напряжениями, относительным удлинением, сопровождающим

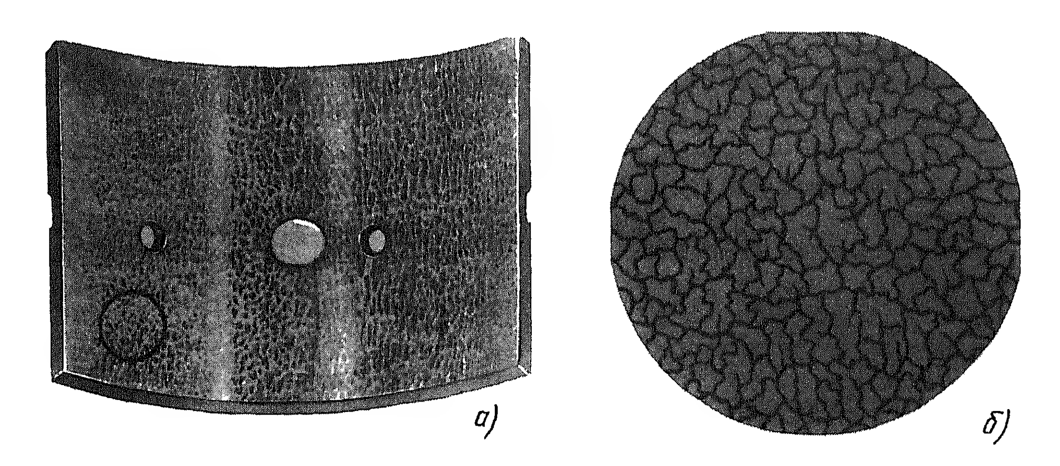


Рис. 13.1. **Подшипник авиадвигателя из свинцовой бронзы с усталостными повреждениями в виде сетки трещин**

приложение сжимающей силы, остаточными напряжениями растяжения, возникающими в сплаве в итоге накапливающейся микропластической деформации с увеличением числа циклов, либо совместным влиянием этих факторов. В реальном подшипнике напряженное состояние металла в слое определяется не только приложенной нагрузкой, но и характером деформации корпуса подшипника в целом. Это означает, что если в материале слоя на жестком основании возникали бы под действием радиального усилия только напряжения сжатия, то изгиб корпуса подшипника с переменой знака кривизны вызывал бы растягивающие напряжения.

Сопротивление усталости антифрикционного слоя зависит от режима работы и конструкции подшипника, антифрикционного материала, физических свойств соединения слоя с основанием, жесткости вала и постели под подшипники и др. Недостаточная жесткость вала, корпусов и крышек подшипников и постелей может стать причиной перекосов цапф относительно подшипников и концентрации нагрузки у краев. Результатом повышенного кромочного давления на подшипниках может быть трещинообразование либо пластический сдвиг мягкого сплава. При неудовлетворительном прилегании вкладышей подшипников к постелям участки вкладышей с неплотным контактом прогибаются; одновременно перегружается остальная рабочая поверхность. Аналогично обстоит дело при невысоком качестве пригонки плоскости нижней съемной головки к пяте стержня так называемого морского шатуна. Конусность и овальность шеек, неправильная геометрия формы и несоответствие размеров вкладышей (особенно тонкостенных) и постелей служат причиной перенапряжения антифрикционного слоя.

Чем выше удельное давление, чем больше амплитуда перемещения соприкасающихся поверхностей, чем быстроходнее машина, тем быстрее исчерпывается выносливость подшипникового материала. Скорость нарастания нагрузки играет, по-видимому, важную роль. Так, сопротивление усталости высокооловянных баббитов в паровых поршневых машинах при тяжелых нагрузках выше, чем в дизелях с присущей им большей скоростью приложения давления.

Весьма значительно влияние роста рабочей температуры подшипника на сопротивление усталости, причем это влияние сказывается как непосредственно, так и через температурные напряжения. Обычная рабочая температура подшипников транспортных дизелей 80...100°С, но имеются двигатели, в которых температура подшипников достигает 150°С. С повышением температуры снижаются все показатели механической прочности, в особенности у баббитов: при температуре 100°С они снижаются примерно в 2 раза по сравнению с показателями при нормальной температуре. Различие в коэффициентах линейного расширения подшипникового сплава и материала основания служит причиной температурных напряжений. Остывание подшипника из баббита (среднее значение коэффициента линейного расширения к $\alpha = 25 \cdot 10^{-6}$) на стальном основании от рабочей температуры 60°С до нормальной может вызвать (в зависимости от механических свойств и соотношения толщин) напряжения, превосходящие предел текучести сплава. Сравнительно небольшое число повторных нагревании и охлаждении в указанном интервале температур приводит иногда к появлению трещины в баббите вблизи стыка с основанием вдоль по окружности. Образование трещин или возможный наклеп сплава в результате циклических термических напряжений неблагоприятно сказывается на сопротивлении усталости. Эти напряжения можно уменьшить, применяя бронзовый вкладыш, а при алюминиевом вкладыше они почти исчезают.

Олово, кадмий и цинк с гексагональным строением кристаллов обладают заметной анизотропией термического расширения. Так, для олова под прямым углом к главным осям $\alpha_{min} = 15 \cdot 10^{-6}$, а в перпендикулярном направлении $\alpha_{max} = 30{,}5 \cdot 10^{-6}$. Неравномерность термического расширения в различных кристаллографических направлениях не дает возможности каждому кристаллу в поликристалле свободно расширяться при повышении температуры; это создает основу для образования остаточных напряжений и пластической деформации. Опыты показывают, что после повторного нагревания электрополированных оловянных образцов их поверхность приобретает шероховатость как у работавших подшипников на оловянистой основе, что свидетельствует о наличии сдвигов внутри материала. В образцах кадмия пластическая деформация обнаруживается в виде тонких линий сдвига, число которых возрастает с увеличением числа циклов нагрева и по мере увеличения интервала температуры. Фактор анизотропии термического расширения является, вероятно, немаловажным в снижении сопротивления усталости сплава. Роль остаточных напряжений, связанных с технологией изготовления подшипника (вкладыша), еще недостаточно изучена.

Сопротивление усталости баббитов на оловянистой основе тем больше, чем выше содержание меди и сурьмы, но при этом повышается хрупкость и ухудшаются антифрикционные свойства сплава. Свинец в оловянных баббитах является вредной примесью. Уже при 0,5% Pb образуется богатая свинцом с низкой температурой плавления фаза в виде сетки. Прочность ее при переменных нагрузках мала. Разрушение сетки приводит к выкрашиванию основных структурных составляющих. Известен случай полного разрушения за несколько часов работы поверхности подшипников дизеля с таким составом антифрикционного слоя: 86,3% Sn; 7,4% Sb; 4,3% Cu; 1,2% Cd; 0,79% Pb. Добавка кадмия несколько тормозит снижение сопротивления усталости оловянных баббитов с повышением температуры.

Согласно испытаниям кольцевых стальных образцов с залитым баббитом на изгиб при асимметричном знакопеременном цикле напряжения, предел выносливости баббитов при нормальной температуре не выявляется на базе 100 млн. циклов. Ограниченные пределы сопротивления усталости оловянно-свинцовых баббитов ниже, чем у баббита Б83. Предел выносливости баббитов на свинцовой основе при нормальной температуре ниже, чем у баббита Б83, но в тяжелых условиях работы при повышенных температурах сопротивление усталости их выше, чем у высокооловянных баббитов. В случае тонкостенных вкладышей с тонким слоем заливки это объясняется более благоприятной структурой, о чем подробнее сказано ниже.

Существует мнение, что высокое сопротивление усталости свинцовых баббитов (свыше 80% Pb) в заливке подшипников дизелей, работающих с частыми пусками, обусловлено кубическим строением кристаллов свинца, благодаря чему он лишен анизотропии термического расширения. Однако, несмотря на гексагональное строение кадмия, сплавы на кадмиевой основе в особо тяжелых условиях более работоспособны, чем оловянные и свинцовые баббиты. Еще выше сопротивление усталости медно-свинцовых сплавов. Это происходит при сравнительно большой толщине слоя (более 2 мм). Свинец в них способен образовывать сплошную сетку или располагаться отдельными зернами. Свинцовые бронзы с сеткой свинца в микроструктуре обладают высокими антифрикционными свойствами, но недостаточным сопротивлением усталости. Олово, никель и серебро в качестве легирующих добавок служат для регулирования структуры. Почти равную износостойкость при большом экономическом эффекте дало массовое применение в тяжелонагруженных подшипниках тракторных дизелей вкладышей из плакированных полосок с алюминиевым сплавом на стальном основании взамен свинцово-бронзовых.

Из подшипниковых материалов наибольшее сопротивление усталости имеет серебро.

М.М. Хрущев, Ю.А. Зильберг, А.П. Бегиджанова установили, что сопротивление усталости антифрикционного слоя на стали повышается с уменьшением его толщины. Это объясняют упрочняющим влиянием стального основания, ограничивающего пластическую деформацию сплава. Испытания сталеалюминиевых вкладышей показали значительно боль-

шую скорость образования и развития усталостной микротрещины у толстых слоев сплава, чем у тонких. Поэтому целесообразно доводить толщину антифрикционного слоя до оптимальной по соображениям лучшего сопротивления абразивному изнашиванию [2].

Важно обратить внимание на связь минимально допустимой толщины слоя с микроструктурой сплава, выявленную Н.А. Буше при эксплуатации главным образом дизелей тепловозов. Подшипники коленчатых валов этих дизелей представляли собой бронзовые тонкостенные вкладыши с внутренним диаметром более 200 мм, залитые слоем баббита Б83 толщиной 0,7 мм. Условия работы коренных подшипников: удельная нагрузка 5,0...8,5 МПа, максимальная окружная скорость на шейке 8 м/с, рабочая температура 80...100°С. Средняя продолжительность работы вкладышей до выхода из строя вследствие усталостного разрушения баббитовой заливки составляла 600 ч. Баббит Б83 имеет пластичную основу из кристаллов α-фазы твердого раствора сурьмы в олове (90% Sn, 10% Sb), в которой располагаются твердые хрупкие кристаллы β-фазы твердого раствора (50% Sn, 50% Sb) и твердые мелкие в виде игл и звездочек кристаллы химического соединения Cu_6Sn_5.

Твердые составляющие антифрикционного слоя можно представить в виде островков, погруженных в тестообразную массу. Воспринимая нагрузку от цапфы, эти составляющие свободно внедряются в мягкую основу, исключая возможность местных повышений давления. Иначе складывается положение с тонкослойным вкладышем (менее 1 мм). Крупные кристаллы β-фазы имеют размеры, достигающие нескольких десятых миллиметра, т. е. того же порядка, что и толщина слоя. Малый промежуток между этими кристаллами и корпусом вкладыша понижает податливость мягкой основы и не позволяет кристаллам в полной мере внедряться в нее. Хуже обстоит дело в случае скопления кристаллов β-фазы на каком-либо участке. Тогда не исключается передача давления от шейки вала на корпус подшипника непосредственно через эти кристаллы, минуя мягкую основу. Так или иначе, в тонкослойном вкладыше существуют условия для значительной перегрузки отдельных кристаллов β-фазы. При циклическом нагружении в них накапливается пластическая деформация, возникают очаги усталостного разрушения. Одновременно ухудшается приработка тонкослойного вкладыша, который и без того, независимо от состава антифрикционного сплава, труднее прирабатывается, чем тонкослойный вкладыш. Затягивающийся процесс приработки дополнительно ухудшает условия работы вкладыша с тонким слоем баббита Б83 и способствует более быстрому выходу его из строя.

По данным Н.А. Буше, для тонкослойных динамически нагруженных вкладышей более приемлемы однофазные сплавы, а из баббитов — сплавы без резко выраженной неоднородности в структуре, с пониженной до *HB* 15...20 твердостью, способствующей лучшей прирабатываемости, но сохраняющей достаточное сопротивление смятию в тонком слое. Этим требованиям удовлетворяют сплавы на свинцовой основе с щелочными или щелочно-земельными металлами. Изыскания привели к разработке кальциевого баббита БК.2: 0,45% Ca; 0,37% Na; 1,5...2,5% Sn; 0,06% Mg;

остальное свинец. Олово введено для улучшения лужения кальциевого баббита, магний — для увеличения коррозионной стойкости сплава. Структура — твердый раствор натрия, олова и магния в свинце, в котором распределены в незначительном количестве мелкие кристаллы Pb_3Ca. Средняя продолжительность службы вкладышей, залитых баббитом БК2, по сравнению с баббитом Б83, повысилась более чем в 3 раза.

Качество соединения антифрикционного сплава с основанием влияет на сопротивление усталости слоя. Может случиться, что процент приставания сплава при плакировании, достаточный для определенного режима, окажется недостаточным при более тяжелом режиме работы биметаллического вкладыша. Меднение перед лужением может привести к образованию хрупкого соединения меди с оловом.

2. Трещинообразование термического происхождения

Растрескивание поверхностей трения в результате термического воздействия наблюдается на бандажах железнодорожных колес и чугунных барабанах тормозов, на сопрягающихся с ними тормозных колодках; встречается в плоских антифрикционных парах с круговой или кольцевой рабочей поверхностью.

В тормозных устройствах поглощаются значительные мощности, возрастающие с повышением скорости движения поездов, посадочных скоростей самолетов и т.п. Требование иметь меньший тормозной путь предопределяет малую длительность торможения и весьма интенсивный нагрев поверхностей с образованием высоких термических напряжений; в результате на поверхностях трения могут появиться трещины. На рельсовом транспорте они впервые были обнаружены на бандажах колес подвижного состава. Трещины располагались почти регулярно поперек рабочей поверхности бандажей при наличии местных подплавлений металла. Еще ранее трещинообразование наблюдалось на трущихся деталях тормозов авиационных колес.

На рис. 14.2 показана поверхность трения тормозного барабана авиаколеса. На рис. 14.3 представлена торцовая поверхность трения стального золотника топливного насоса с трещинами, выявленными методом цветной дефектоскопии. Торец золотника работает как подпятник бронзового ротора насоса. На бронзе ротора растрескивания не наблюдалось.

Образование трещин повышает износ поверхностей трения, острые кромки производят режущее действие, а вблизи кромок происходит выкрашивание материала. Трещины со временем забиваются продуктами износа, действующими как абразив. Выход радиальных трещин на соприкасающуюся с внешней средой цилиндрическую поверхность колец торцовых контактных уплотнений вращающихся валов нарушает герметичность.

Л.Б. Эрлих [3] дает такое объяснение природы терморастрескивания. Быстрый нагрев поверхности трения при большом градиенте температуры по глубине вызывает в поверхностном слое напряжения сжатия. Эти

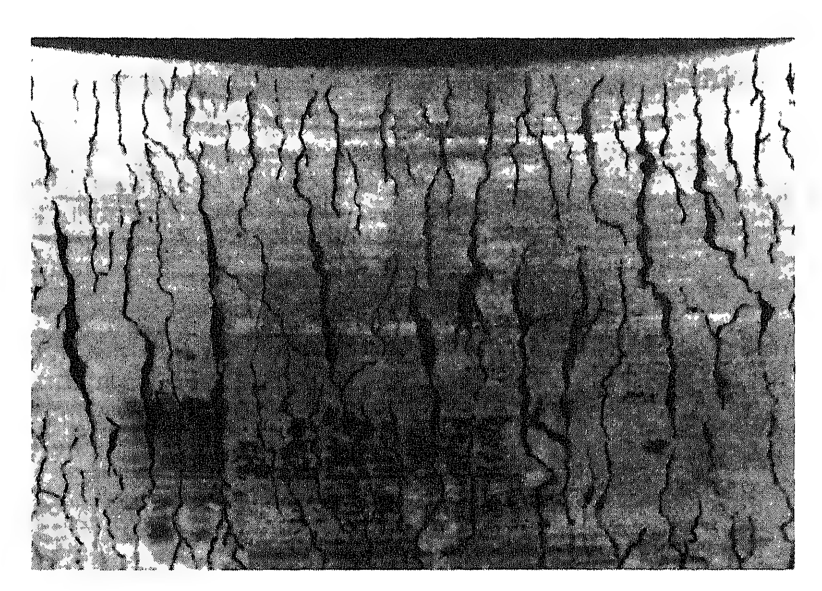


Рис.13.2. **Трещины на поверхности трения чугунного барабана авиаколеса**

напряжения значительно превосходят по абсолютной величине растягивающие напряжения в остальной части детали и обусловливают при определенных условиях неустойчивость упругого или упругопластического состояния этого слоя. Такими условиями является высокий нагрев поверхностного слоя или переход его в пластическое состояние; при этом модуль упругости материала принимает малые значения. Этот слой становится подобным сжатой пластине или оболочке из эластичного материала на упругом основании. Неустойчивость исходной формы приводит к образованию гофра. Цилиндрическая поверхность бандажа или барабана превращается в гофрированную, причем выступы и впадины идут параллельно оси. Выступы волнистой поверхности концентрируют нагрузку, происходит их перегрев, они становятся местами подплавления и очагами зарождения трещин.

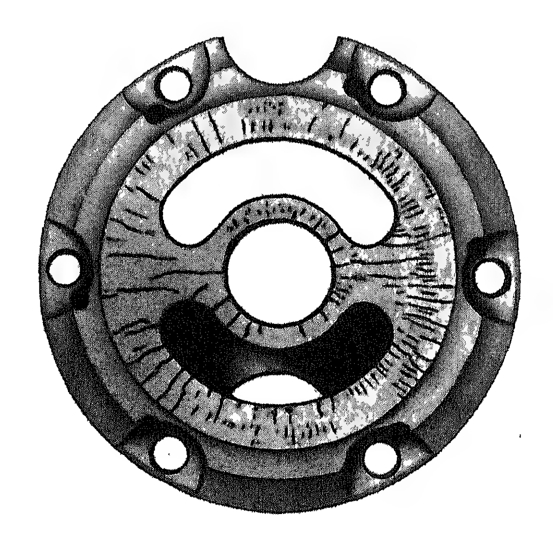


Рис. 13.3. **Трещины на упорной поверхности трения золотника топливного насоса**

Н.И. Голубев в общем аналогично трактует появление радиальных трещин в

кольцах торцовых уплотнений вращающихся валов, но без детального анализа обстоятельств переформирования плоской кольцевой поверхности в волнообразную. Реальность такого изменения усматривается в том, что растрескивание колец сопровождается появлением темных радиальных полос на рабочей поверхности, чередующихся со светлыми. Темные полосы — это следы перегрева на выступах волн, светлые полосы — впадины.

В некоторых случаях объяснение трещинообразованию следует, вероятно, искать в термической усталости материала.

Образование трещин на поверхностях трения стальных и чугунных деталей в паре с другими материалами и при смазывании углеводородными жидкостями (масла, гидрожидкости, топливо) при тяжелых режимах работы возможно в результате концентрации в зоне контакта диффузионно-способного водорода, который охрупчивает стальную и чугунную поверхности.

В тяжелонагруженных тормозных устройствах трещинообразование может быть результатом действия водорода (см. гл. 6).

Трещины на рабочих поверхностях тормозов высокой энерго-нагруженности признаются неизбежными и на некоторой стадии развития не снижают надежности торможения, поэтому существуют допуски на трещины.

Например, чугунные барабаны авиационных тормозов бракуют из-за трещин лишь тогда, когда они выходят на торцовую поверхность и достигают глубины свыше 5 мм.

Мерой борьбы с терморастрескиванием может оказаться выбор материала. Чем выше теплопроводность материала, чем меньше температурное расширение, чем пластичнее материал, тем меньше вероятность образования в нем трещин. Склонны к терморастрескиванию хрупкие и обладающие малой теплопроводностью материалы — стекло и керамика, твердые сплавы, закаленные стали, а также сплавы с большим содержанием никеля или с висмутом, которые хотя и имеют невысокую твердость, но обладают низкой теплопроводностью. Мало склонны к растрескиванию углеграфиты; они обладают высокой теплопроводностью и малым коэффициентом линейного расширения. Полимеры типа ПТФЭ не подвержены растрескиванию.

Высокая точность обработки поверхностей трения и тщательная их приработка — дополнительное средство борьбы с растрескиванием.

Например, трещинообразование торца золотника (см. рис. 13.3) удалось ликвидировать улучшением пригонки сопрягающихся поверхностей и заменой одной марки стали на другую.

3. Трещинообразование на поверхности деталей от перенаклепа

Такой вид повреждения может встретиться в условиях трения качения, когда твердость поверхности не настолько низка, чтобы произошла заметная пластическая деформация, и не настолько высока, чтобы предупредить микропластическую деформацию в пределах всей рабочей поверхности. На рис. 13.4 показан вогнутый зуб колеса передачи Новикова с растрескавшейся из-за перенаклепа поверхностью.

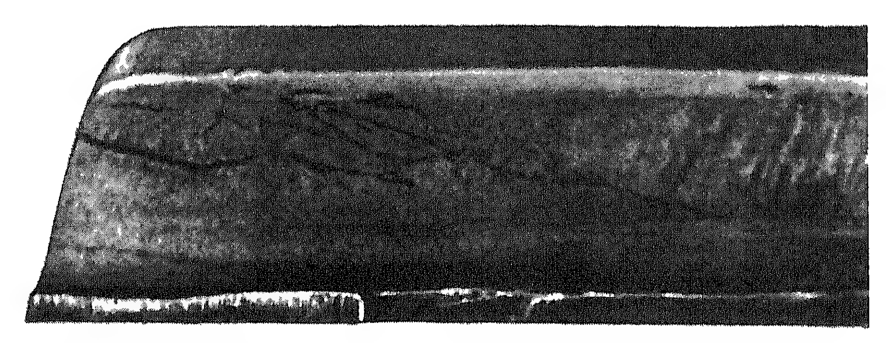


Рис.13.4. **Трещины на боковой поверхности зуба передачи Новикова (по данным И.Н. Френкеля)**

Материал колеса — сталь 45, твердость *HB* 187...192.

1. Контактная усталость при качении и качении со скольжением

Характерным повреждением катящихся под нагрузкой или с проскальзыванием металлических поверхностей являются раковины, ямки, оспинки (так называемые питтинги). Поверхность приобретает местное выкрашивание.

Питтинг — это особый вид повреждения поверхности при перемещающемся контакте под действием переменных напряжений, превышающих некоторый предел для данного материала. Иначе говоря, питтинг — это процесс контактной усталости поверхностей при качении или при качении со скольжением. Исследованию этого процесса посвящены многочисленные эксперименты на роликовых (дисковых) машинах, непосредственно над зубчатыми колесами и над подшипниками качения.

Приняв в качестве критерия усталостного разрушения ту или иную степень повреждения поверхности, можно по результатам испытаний на роликовой машине построить кривую выносливости. Ее уравнение имеет тот же вид, что и при усталостных испытаниях:

$$\sigma_K^m N = C$$

где $\sigma_к$ — временной предел контактной выносливости при N пульсирующих циклов напряжений; m — коэффициент, получаемый опытным путем, — показатель степени; С — константа материала при данных условиях испытания.

Величина $\sigma_к$ определяется при данной постоянной нагрузке как наибольшее напряжение на контактной площадке. Применительно к прямозубым колесам $\sigma_к$ следует вычислять при каждой нагрузке как контактное напряжение на полюсной линии или на другой линии в зоне, неблагополучной в отношении выкрашивания.

Ордината асимптоты кривой контактной выносливости равна длительному пределу контактной выносливости $\sigma_{ку}$.

Необходимым условием образования питтинга является некоторая степень металлического контакта смазанных поверхностей. При его отсутствии, как показали опыты Р.Н. Даусона [5] на дисковой машине, выкрашивание не наступает даже при переменных контактных напряжениях, вдвое превышающих длительный предел контактной выносливости.

При некотором числе циклов напряжений и достаточном контактном напряжении образуется первичная микротрещина. При изотропном материале зарождение ее следовало бы отнести к точке, в которой действует наибольшее касательное напряжение или наибольшее приведенное напряжение по Гесту—Мору.

Нормальной силе соответствуют симметричное распределение напряжений относительно линии ее действия и наибольшее касательное

напряжение в точке, расположенной на некоторой глубине от поверхности.

Однако субповерхностный слой в большей мере, чем при неподвижном контакте, подвергается пластическому деформированию, результатом чего является неоднородность структуры и остаточные напряжения, что отразится на твердости. Об изменении твердости в процессе контактирования поверхностей можно судить по данным В.А. Гришко (рис. 14.1) на основании результатов измерения твердости вдоль профиля зуба колеса из углеродистой стали 45 после обкатки на стенде в течение 700 ч при максимальном контактном давлении на начальной окружности 400 МПа. Трещина может зародиться на глубине и на поверхности в зависимости от соотношения между нормальной и тангенциальной составляющими силы в контакте и от изменений физико-механических свойств материала в поверхностном слое. Часто трещина начинается на поверхности, на границе зерен.

Если трещина зародилась на глубине, то на известной стадии ее развития она может выйти на поверхность. Первичная трещина распространяется, независимо от пункта ее зарождения, наклонно к поверхности в соответствии с направлением приведенного напряжения и приобретенной благодаря пластической деформации анизотропии материала. В трещину с поверхности проникает масло. Когда открытый конец трещины вступает в контакт с сопряженной поверхностью, выход для масла закрывается. В масле под нагрузкой в контакте возникает высокое давление, распирающее стенки трещины. При повторных нагружениях трещина углубляется, а затем выходит на поверхность, отделяя выкрашивающийся объем металла (рис. 14.2). На поверхностях с постоянным направлением обкатывания раковины имеют веерообразную форму. Исследования выкрошившихся частиц показали, что поверхность первичной тре-

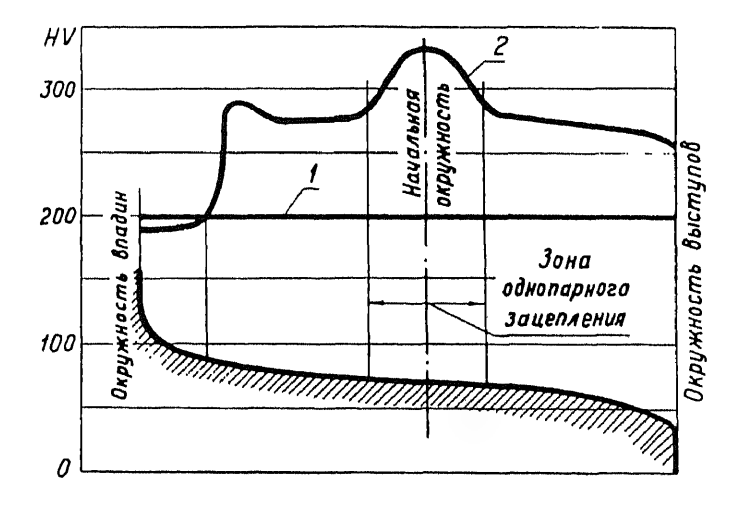


Рис. 14.1. **Изменение твердости по Виккерсу вдоль профиля зуба:**
1 — ненагруженная сторона зуба; *2* — нагруженная сторона зуба

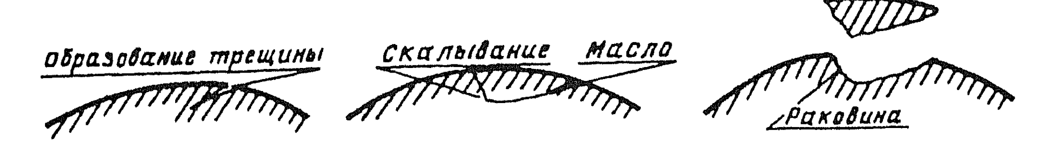


Рис. 14.2. **Схема образования усталостной раковины**

щины гладкая или ступенчатая, в то время как остальная ее поверхность рваная. Под электронным микроскопом у гладкой поверхности обнаруживается изменение исходной структуры. Выявлены подповерхностные трещины в основном материале в зоне выкрашивания.

При отсутствии масла образуются начальные трещины такого же характера, но вследствие износа вершин неровностей, на которых начинаются трещины, последние не успевают распространиться вглубь. Поэтому в открытых зубчатых передачах, в которых мало смазочного материала и на поверхности трения оседают абразивные частицы, питтинг наблюдается редко.

При качении со скольжением опережающая поверхность имеет, по различным данным, на 30...100% более высокий предел выносливости, чем отстающая поверхность из той же стали, мягкой или средней твердости. Г.К. Трубин дал такое объяснение этому факту [2].

Силы трения в контакте на опережающей поверхности направлены против, а на отстающей — по скорости скольжения. Сообразно действию касательных сил, в контакте развиваются поверхностные трещины, направление которых показано на рис. 14.3. Раскрытая трещина на отстающей поверхности *2* развивается навстречу направлению действия. Масло с большой скоростью поступает в трещину и производит на ее стенки распирающее действие, близкое к ударному. Вслед за этим трещина закрывается, и давление на стенки еще больше возрастает. На опережающей поверхности *1* гидродинамическое давление в слое смазочного материала выдавливает масло из трещины. Поэтому на опережающей по-

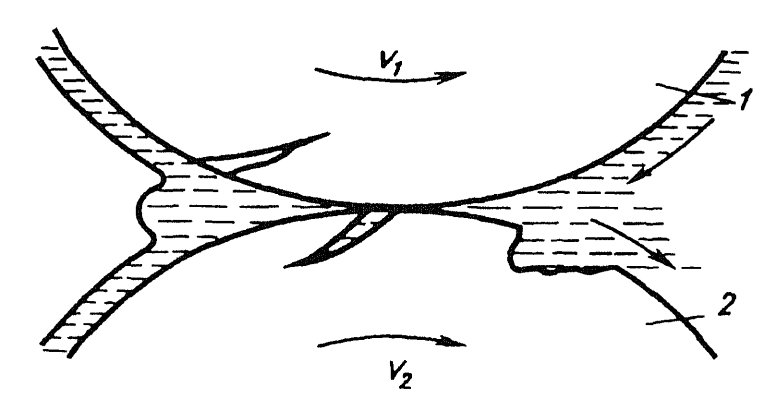


Рис. 14.3. **Схема роста поверхностных трещин при обкатке поверхностей со скольжением (направление мил трения показано стрелками)**

верхности питтинг либо совсем не развивается, либо развивается со значительным замедлением. Это проявляется, в частности, в том, что при близких по механическим свойствам материалах зубчатых колес язвины образуются на ножках зубьев отстающей поверхности, а на опережающей поверхности повреждения отсутствуют или незначительны.

В принципе нельзя говорить о контактной усталости только материала, поскольку в процессе обкатки участвуют два твердых тела и смазочный материал.

Контактная усталость материалов в реальной конструкции определяется физико-механическими свойствами материала, скоростью качения, удельной скоростью скольжения, режимом нагружения, вязкостью масла, способом его подачи, шероховатостью поверхностей и др. Эти вопросы наиболее подробно изучались на зубчатых колесах Г.К. Трубиным, В.А. Гришко, Д.Н. Решетовым и др. [1, 4].

От скорости качения и удельного скольжения зависят напряжения, тепловое состояние зоны контакта и физико-механические изменения поверхностного слоя. Кратковременные перегрузки зубчатых колес, сопровождаемые разрушением масляной пленки, а также пуски тихоходных передач, находящихся под нагрузкой, повышают контактную прочность вследствие износа материала с зачатками усталостных трещин. Влияние смазочного материала сложное: повышение его вязкости положительно влияет на нагрузочную способность передачи, однако увеличивает силы трения и касательные напряжения. Контактная прочность зубьев колес при недостаточном смазывании погружением выше, чем при обильной подаче масла; при смазывании погружением она больше, чем при струйном. Это можно, видимо, объяснить большим гидродинамическим давлением в зарождающихся усталостных трещинах при струйном смазывании, когда оно производится жидким маслом, а не в смеси с воздухом.

Если более твердый материал с меньшей шероховатостью поверхности работает в паре с более мягким материалом, то он выглаживает поверхность последнего. В противном случае мягкая поверхность делается более грубой.

2. Начальное и прогрессирующее выкрашивание

Различают выкрашивание начальное и прогрессирующее. Иногда в начальной стадии работы контактирующихся поверхностей наблюдается выкрашивание, которое затем прекращается, а образовавшиеся ямки заплывают металлом. Происходит своего рода самозалечивание. Такое выкрашивание называют начальным в отличие от прогрессирующего, которое не прекращается.

Условия начального и прогрессирующего выкрашивания по Г.К. Трубину следующие. Длительный предел контактной выносливости $\sigma_{ку}$ материалов, способных наклепываться, имеет наименьшую величину при начальном состоянии контактирующихся поверхностей. Дальнейшее воз-

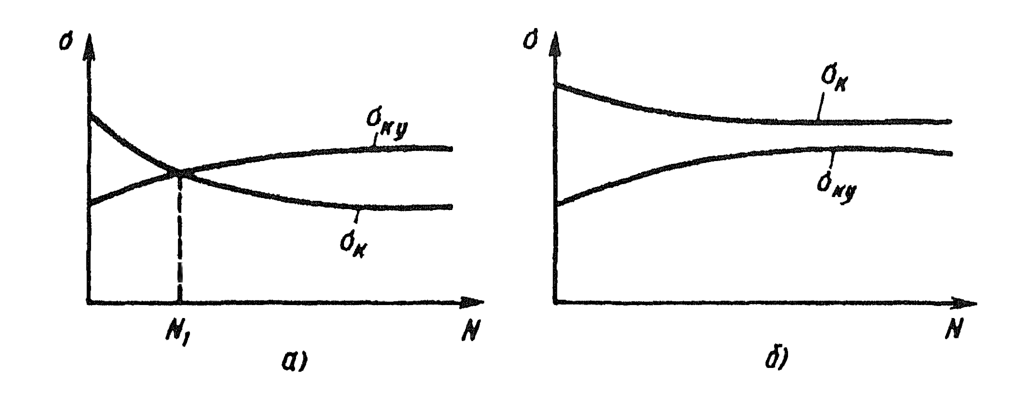


Рис. 14.4. **Условия начального (а) и прогрессирующего (б) выкрашивания**

растание $\sigma_{ку}$ происходит благодаря повышению твердости поверхностных слоев вследствие наклепа и выглаживания, уменьшающего концентрацию напряжений поверхностными неровностями. Выглаживание, кроме того, приводит к постепенному снижению приведенного контактного напряжения $\sigma_к$. Пусть вначале $\sigma_{ку} < \sigma_к$ тогда после некоторого числа циклов можно ожидать выкрашивание. Если в результате повышения $\sigma_{ку}$ и убывания $\sigma_к$ последнее, т.е. $\sigma_к$ после числа циклов N_I станет меньше предела контактной выносливости (рис. 14.4, *а)*, то выкрашивание прекратится. Если же, несмотря на увеличение $\sigma_{ку}$ и уменьшение $\sigma_к$. неравенство $\sigma_{ку} < \sigma_к$ сохраняется (рис. 14.4, *б)*, то выкрашивание будет прогрессирующим. Говоря о начальном и прогрессирующем выкрашивании, имеют в виду, что в случае линейного контакта нагрузка распределена равномерно.

В зубчатых передачах различают также прогрессирующее и ограниченное, или местное, выкрашивание. На мягких поверхностях зубьев в начальной стадии их работы часто наблюдается выкрашивание на ограниченных участках, являющихся зонами концентрации напряжений вследствие наличия местных выступов или других причин. Выкрашивание продолжается до тех пор, пока в результате его и износа нагрузка не распространится на большую поверхность. Влияет также наклеп поверхности. После завершения ограниченного выкрашивания работу зубчатой передачи можно считать вполне надежной.

Выкрашивание твердых рабочих поверхностей, как правило, не бывает ограниченным. После появления мельчайшей оспины материал вследствие его хрупкости скалывается с ее стенок, и оспина разрастается до крупной язвины. Однако передача может еще работать сотни часов до полного повреждения поверхности в результате выкрашивания.

Длительность начального выкрашивания может быть очень большой и исчисляться даже миллионами циклов. Подтверждением может служить такой пример. У мощного зубчатого редуктора зубья колес тихоходной ступени выкрашивались; на каждом полушевроне за сотни часов вся рабочая поверхность покрывалась язвинами. Затем поверхность наклепалась и выгладилась, и редуктор был доведен до полной проектной нагрузки.

3. Повреждения в виде отслаивания

Другим видом повреждения деталей под действием переменных контактных напряжений является отслаивание, т.е. отлущивание чешуек, имеющих иногда весьма заметные размеры. Отслаивание возникает в результате образования и развития продольной трещины на некоторой глубине с выходом ее на поверхность.

Отслаивание твердой корки металла наблюдается в деталях, которые азотированы, цементованы, цианированы или подвергнуты поверхностной закалке. Касательные напряжения на стыке твердой корки с сердцевиной приводят к разрушению ее тем быстрее, чем больше касательные напряжения внутри корки. Это объясняется определенным соотношением сопротивления усталости сердцевины и упрочненного слоя. Увеличивая его толщину, часто удается ликвидировать отслаивание. Однако встречается отслаивание прокатных валков, подвергнутых поверхностной закалке, у которых при прокатке в связи с большими тангенциальными силами в контакте зона наибольших касательных напряжений почти подходит к поверхности; это свидетельствует о действии дополнительных факторов. На разрушения, происходящие под поверхностью, помимо контактных напряжений, влияют остаточные напряжения от термической или термохимической обработки и напряжения от общей деформации детали.

Кроме того, причиной отслаивания может быть значительное пластическое деформирование неупрочненной поверхности детали под действием контактной нагрузки. При качении без смазочного материала или с пластичным смазочным материалом возникающие на поверхности усталостные трещины залечиваются (слипаются) при пластической деформации, а на глубине, в связи с неоднородностью структуры, появляются опасные остаточные напряжения.

Отслаиванию могут способствовать и дефекты металла в виде неметаллических включений, наличия свободного цементита и др.

Отслаивание весьма малой глубины обязано локальной пластической деформации отдельных неровностей поверхности, а также образованию пластически деформированных объемов металла, насыщенного кислородом воздуха, смазочным материалом или углеродом смазочного материала [3].

4. Влияние поверхностно-активных веществ на контактную прочность металлов

Введение поверхностно-активных веществ в смазочный материал повышает нагрузочную способность пар трения, снижает коэффициент трения и интенсивность изнашивания. Испытания стальных образцов на усталость в маслах и других жидкостях, содержащих и не содержащих поверхностно-активных веществ, показали, что наличие последних уменьшает предел выносливости сталей. Поскольку физическая сущность процесса контактного разрушения металлов аналогична процессу

разрушения при усталости и далека от разрушения металлов при трении, то можно было ожидать, что введение в смазочный материал поверхностно-активных веществ приведет к снижению контактной прочности металлов.

Этому вопросу была посвящена работа [4]. На контактную усталость испытывали ролики из стали 18Х2Н4МА с твердостью около *HRC* 60. Максимальные нормальные напряжения при стационарном нагружении 2000...2800 МПа, приведенный радиус кривизны роликов 13,139 мм, суммарная окружная скорость роликов 17,67 м/с, скорость скольжения 0,55 м/с (6% от окружной скорости контрролика), температура масла на входе в контакт 100°С. Смазывание струйное.

При испытании использовали следующие смазочные материалы:

1) масло МТ-8П пониженной вязкости, применяемое для гусеничных машин и содержащее в небольших количествах противопенную, противоизносную и противозадирную присадки; 2) масло ТСЗП-8 пониженной вязкости, содержащее противозадирную, противоизносную и противоокислительную присадки, имеет пологую вязкостно-температурную характеристику и применяется для тяжелых гусеничных машин и грузовых автомобилей на Севере; 3) масло ТАД-17и средней вязкости с фосфорсодержащей присадкой, применяется для гипоидных передач легковых автомобилей; 4) синтетическое масло Б-3В пониженной вязкости на основе сложных эфиров низкомолекулярных карбоновых кислот, содержащее противоокислительную, противозадирную и противоизносную присадку, имеет пологую вязкостно-температурную характеристику, применяется для вертолетов и турбовинтовых двигателей.

При испытании не наблюдалось как заедания, так и пластической деформации роликов. Результаты испытаний роликов в логарифмических координатах в виде кривых усталости при вероятности отказа 50% приведены на рис.14.5. Из приведенных данных видно, что масла имеют различные противопиттинговые свойства и могут оказать влияние на сопротивление контактной усталости зубчатых колес, особенно при малых контактных напряжениях ($\sigma_к$ = 2000 МПа). При высоких напряжениях различие в противопиттинговых свойствах масел уменьшается, и при $\sigma_к$ = 2800 МПа оно практически исчезает. Таким образом, введение

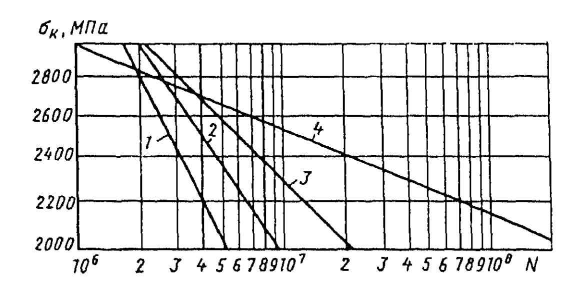


Рис. 14.5. **Кривые усталости роликов из стали 18Х2Н4МА при смазывании различными смазочными материалами:**
1 – Б-3В; *2* – ТАД-17; *3* – ТСЗП-8; *4* – МТ-8П

активных веществ в смазочные материалы в целях снижения вероятности заедания контактных пар может привести к снижению сопротивления контактной усталости [4].

4. Контактная усталость пластмасс

Пластмассовые детали при контактных нагрузках могут подвергаться изнашиванию и контактной усталости. При умеренном выделении теплоты наблюдается мелкое выкрашивание материала в зависимости от вида смазочного материала или отслаивание.

Эксперименты С.В. Щербакова, М.Б. Каплина показывают, что контактная прочность образцов из пластмасс уменьшается, если они ранее находились в контакте со смазочным материалом. Дело в том, что полимеры при соприкосновении со смазочным материалом набухают. Набухание происходит постепенно, в течение длительного времени (до 60 сут). Образцы испытывали в трех маслах: приборном МВП, индустриальном и авиационном МС-20. Наибольшее набухание было в приборном масле, наименьшее — в авиационном. Наличие смазочных материалов приводит к ослаблению межмолекулярных связей полимеров, что вызывает снижение их прочностных свойств.

Глава 15. СВЯЗЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ С ТРЕНИЕМ И ИЗНАШИВАНИЕМ

1. Общие сведения

Многие детали, которые должны удовлетворять условиям общей прочности при переменных напряжениях, подвергаются в эксплуатации воздействию сил трения. Это валы, оси и шпиндели, у которых шейки работают в паре с подшипниками скольжения или контактируют непосредственно с роликами в случае монтажа на роликоподшипниках без внутреннего кольца; поршневые пальцы; пальцы прицепных шатунов; шаровые пальцы; элементы цилиндрических и конических сопряжении; листовые рессоры и другие детали. Зубья колес и рельсы работают при циклических напряжениях изгиба и трения качения со скольжением. Поскольку усталостное разрушение деталей начинается с поверхности или с приповерхностного слоя, то изменение геометрии, химического состава, структуры, системы собственных напряжений в поверхностях трения по сравнению с исходным состоянием не может не сказаться на сопротивлении усталости деталей. Исследованием этого вопроса занимались Б.Д. Грозин, Л.М. Школьник, Д.А. Драйгор, В.Т. Шарай, Г.И. Вальчук и др. [1, 2].

2. Влияние шероховатости поверхности

Очевидно уменьшение шероховатости и упрочнение поверхности в процессе приработки повышает сопротивление усталости деталей. Если шероховатость поверхности во время приработки ухудшается, поверхностный слой разупрочняется, в нем появляются остаточные растягивающие напряжения или убывают по абсолютной величине исходные напряжения сжатия, то сопротивление усталости деталей уменьшается. Влияние износа на прочность при повторно-переменных нагрузках может, таким образом, быть как отрицательным, так и положительным. Это подтверждено исследованиями Д.А. Драйгора и В.Т. Шарая на ряде режимов трения скольжения. К сожалению, опытных данных недостаточно, чтобы применительно к конкретным машинам с характерными для их узлов скоростями скольжения и материалами пар трения указать давления, при которых их положительное влияние будет наибольшим, а также давления, начиная с которых пластическая деформация поверхностного слоя на приработке будет сопровождаться разрыхлением структуры. Однако некоторые режимы трения легко оценить по их влиянию на прочность.

Если изнашивание протекает в виде диспергирования, то оно не создает условий для снижения сопротивления усталости. Абразивное изнашивание может увеличить шероховатость поверхности. Независимо от того, какой вид изнашивания является ведущим, царапины (в особенности одиночные), нанесенные абразивными частицами, представляют опас-

ность как сильные концентраторы напряжений, причем тем большую, чем прочнее сталь. Однако достаточно иметь представление о действии концентраторов напряжений, чтобы схватывание при наличии глубинного вырывания отнести к неблагоприятным для циклической прочности факторам. Изнашивание, приводящее к уменьшению линейных размеров с образованием уступов, создает значительный геометрический концентратор напряжений. Такой случай может быть, например, в зубьях колес, сферических цапфах и цапфах валов и осей.

3. Вырывы при схватывании

Следы глубинного вырывания поверхностей трения служат очагами разрушения как концентраторы и, по-видимому, как места надрывов материала. Налипший материал тоже является концентратором. При испытаниях на круговой изгиб образцов из нормализованной стали 45 с очагами схватывания, образовавшимися на пути трения 94,9 м при скорости скольжения 0,314 м/с и давлении 0,9 МПа, обнаружено снижение значения σ_{-1} в воздухе на 8% и в масле МС-20 на 11%. В.Т. Шарай и Д.А. Драйгор установили резкое снижение долговечности при круговом изгибе и напряжениях выше предела выносливости образцов с очагами схватывания нормализованных сталей 40Х и 45.

Долговечность, измеряемая числом циклов до разрушения, может быть в десятки раз ниже долговечности образцов с неповрежденными схватыванием поверхностями. Закаленные стали с низким отпуском, имея метастабильную структуру, претерпевают на участках схватывания, где возникают значительные температуры, глубокие структурные изменения: образуются структуры высокого отпуска и переходные к исходной, растет зерно. Появление или существенное усугубление структурной неоднородности сильно снижает прочность. Испытания на воздухе закаленных с низким отпуском образцов из стали 45 с очагами схватывания, сформировавшимися на указанном выше режиме трения, показали снижение σ_{-1} на 48,4%. Полное удаление следов схватывания путем зачистки и полирования восстанавливает исходную долговечность только для сталей стабильных структур, для сталей же метастабильных структур, как показал Д.А. Драйгор, долговечность остается резко пониженной по сравнению с начальной [2].

Вырывы материала, налипание и структурные преобразования, образующие геометрические и структурные концентраторы напряжения, — таковы в общем причины падения циклической прочности при изнашивании при заедании. К ним следует добавить значительные напряжения, вызванные местными тепловыми импульсами. Отличительной особенностью механизма усталостного разрушения сталей при наличии очагов схватывания является, как и следовало ожидать, зарождение и развитие усталостных трещин на нескольких участках поверхности образца. Что касается масштабного фактора, то опыты Г.И. Вальчука показали, что число циклов до разрушения поврежденного схватыванием образца с увеличением диаметра возрастает при постоянной частоте нагружения.

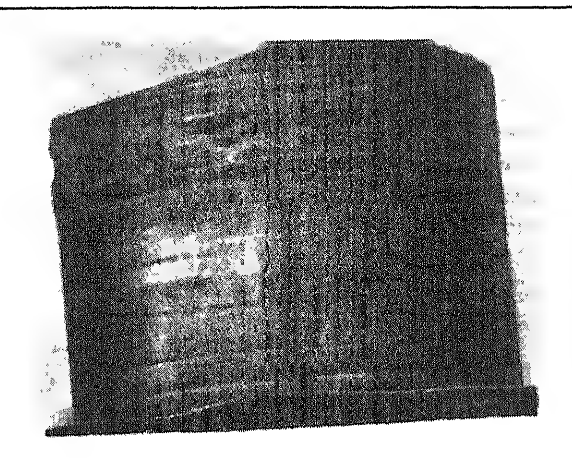


Рис. 15.1. **Усталостное разрушение шейки коленчатого вала тракторного джвигателя**

На рис. 15.1 показана закаленная с нагревом ТВЧ шейка разрушенного от усталости коленчатого вала тракторного двигателя, работавшая в паре с вкладышем, залитым свинцовой бронзой.

Такие же повреждения характерны и для других вышедших из строя коленчатых валов этого двигателя. Вырывы металла с поверхности шейки и налипание бронзы наблюдается в местах контакта с вкладышем, примыкающим к его кромкам. Трещины ориентируются почти вдоль образующих. Выявлена большая неоднородность структуры и твердости закаленного слоя на участках схватывания.

4. Эффект Ребиндера

Предел выносливости деталей, работающих в поверхностно-активной среде уменьшается в соответствии с эффектом Ребиндера. Иначе обстоит дело при воздействии сил трения скольжения или качения, которые в присутствии поверхностно-активного смазочного материала обусловливают большую степень и глубину наклепа поверхностного слоя, чем при действии на поверхность тех же нормальных сил, но в неактивной среде. Упрочнение поверхности и остаточные на пряжения сжатия повышают предел выносливости. При периодическом деформировании поверхностного слоя в поверхностно-активном смазочном материале полученный наклеп сохраняется дольше.

Одновременное воздействие трения качения и кругового изгиба приводит к тому, что с ростом числа циклов контактного нагружения и увеличением степени выкрашивания эффект упрочнения менее значим по сравнению с действием других факторов, и разрушение, по данным Г.И. Вальчука, может наступить при напряжениях ниже предела выносливости.

5. Влияние фреттинг-коррозии

Случаи усталостного разрушения валов, осей и других деталей под напрессованными деталями при сравнительно невысоких номинальных напряжениях широко известны. Понижение сопротивления усталости стальных деталей в зоне их контакта является результатом совместного проявления концентрации напряжений, фреттинг-коррозии и сопровождающего ее электроэрозионного разрушения.

О листовых рессорах было сказано ранее (см. гл. 12). Рассмотрим усталостное разрушение главного шатуна авиационного двигателя типа АШ (рис. 15.2). Разрушение явилось следствием фреттинг-коррозии между омедненной наружной поверхностью втулки из стали 15 и хромированной внутренней поверхностью кривошипной головки главного шатуна из стали 40ХН2МА, термически обработанного до твердости HRC 34...40.

На сопряженной поверхности головки видны очаги фреттинг-коррозии и вырывы (вследствие схватывания) в местах, откуда хром переносился на омедненную поверхность. Не исключаются вырывы основного металла шатуна под слоем хромового покрытия. Глубина отдельных вырывов достигает 65 мкм [5].

Связь скорости изнашивания с сопротивлением усталости деталей бывает довольно сложной. Прочность детали при работе в узле трения может остаться неизменной, но может и снизиться со временем из-за изменений условий и характера взаимодействия между деталями. Более интенсивное изнашивание при фреттинг-коррозии на части поверхности контакта деталей может вызвать эксцентричность в приложении осевой

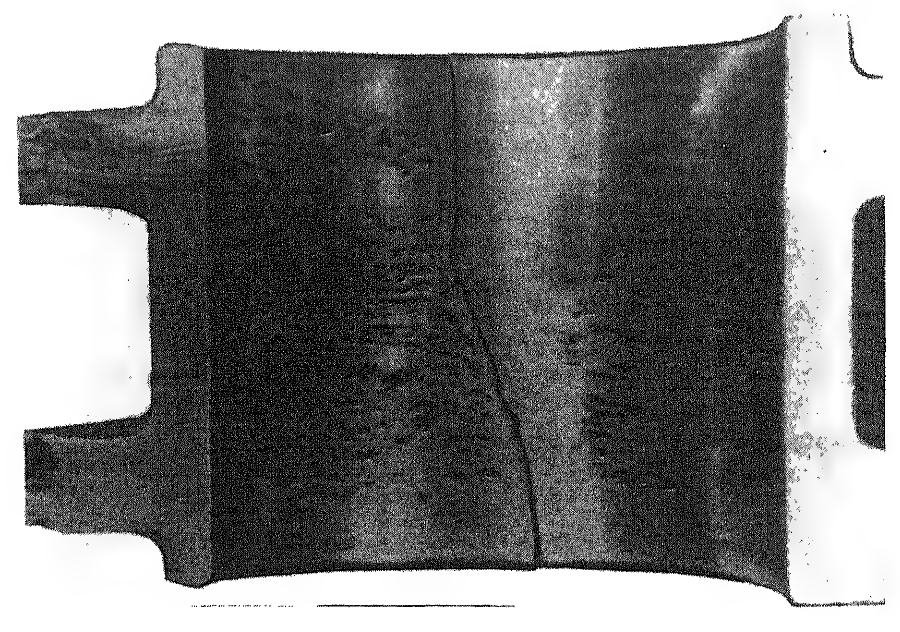


Рис. 15.2. Усталостная трещина в результате фреттинг-коррозии кривошипной головки главного шатуна звездообразного двигателя

нагрузки. Неравномерная осадка многоопорного вала вследствие различного износа вкладышей и шеек по отдельным подшипникам вызывает дополнительные напряжения в вале и перегружает отдельные опоры. Увеличение зазоров в сочленениях механизмов с возвратно-поступательным или качательным движением повышает коэффициент динамичности нагрузки. Известны случаи поломки рельсов из-за образования на поверхности качения колес лысок при скольжении колес по рельсам во время резкого торможения состава либо в период трогания поезда с места с заторможенными колесами вагонов. При входе и выходе лыски из контакта с рельсом возникают весьма значительные контактные напряжения, суммирующиеся с напряжениями изгиба.

6. Расплавление подшипников

Особо следует остановиться на повреждениях шеек валов и осей в результате расплавления цветных подшипниковых сплавов вкладышей подшипников при их перегреве. Контакт расплавленных баббитов и бронз со стальными деталями в напряженном состоянии приводит к образованию трещин и надрывов, становящихся очагами усталостного разрушениях [3, 4]. Если расплавленный металл смачивает сталь, то он проникает в раскрытые под действием растягивающих напряжений микротрещины поверхности стальной детали и, адсорбируясь на стенках трещины, уменьшает поверхностную энергию основного материала и тем самым снижает его прочность. Из практики работы железнодорожного транспорта известны случаи изломов шеек осей колес уже в процессе "горения" букс. Существенное значение для таких изломов может иметь высокотемпературный нагрев поверхностного слоя металла оси и связанное с этим значительное снижение пределов текучести и прочности.

В результате износа видоизменяется макрогеометрия поверхности трения; она приобретает новую конфигурацию или изменяются ее размеры. Для характеристики макроизменений на сопряженных поверхностях целесообразно все пары трения разбить по кинематическим признакам и условиям контактирования поверхностей на семь групп.

Первая группа охватывает пары трения скольжения с осесимметричными поверхностями, находящимися в одновременном контакте по всей номинальной площади касания; осью симметрии является ось вращения одной из поверхностей при неподвижной другой. К этой группе относятся плоские и кольцевые пяты, диски и конусы фрикционных муфт и тормозов, направляющие кругового движения и другие пары. Для пар этой группы скорости скольжения всех течек, расположенных на круговой траектории произвольного радиуса, равны. Поэтому при центрально действующей осевой силе и осесимметричной жесткости сопряженных деталей распределение износа на каждой поверхности трения будет тоже ссесимметричным; в частности оно может быть равномерным. Осевое сечение детали дает представление о форме изношенной поверхности.

Если вследствие неточностей монтажа или по другим причинам приложенная осевая сила эксцентрична, то давления в точках, лежащих на одной круговой траектории, уже не будут одинаковы. Износ вращающейся поверхности по-прежнему будет осесимметричным, так как любая точка круговой траектории за один оборот подвергается воздействию давлении в одинаковой последовательности. У неподвижной поверхности будет наблюдаться неравномерность износа не только в осевых сечениях, но и на круговых траекториях.

Во вторую группу входят вращательные пары, в которых одна поверхность прения подвергается местному нагружению, а сопряженная с ней — циркуляционному нагружению при постоянной силе. Деталями этой группы являются подшипники, цапфы и колодочные тормоза.

Местным нагружением круговой цилиндрической поверхности называют такой вид нагружения, когда радиальная нагрузка воспринимается одним и тем же ограниченным участком поверхности. Циркуляционное нагружение — вид нагружения, когда вращающаяся цилиндрическая поверхность нагружается радиально-последовательно по всей окружности.

При действии постоянной радиальной силы вращающийся .вал подвергается циркуляционному нагружению, а подшипники — местному. При любой эпюре давлений рабочая поверхность вала будет изнашиваться равномерно по окружности, а износ подшипника будет односторонним (рис. 16.1, *а*). При граничной смазке и трении без смазочного мате-

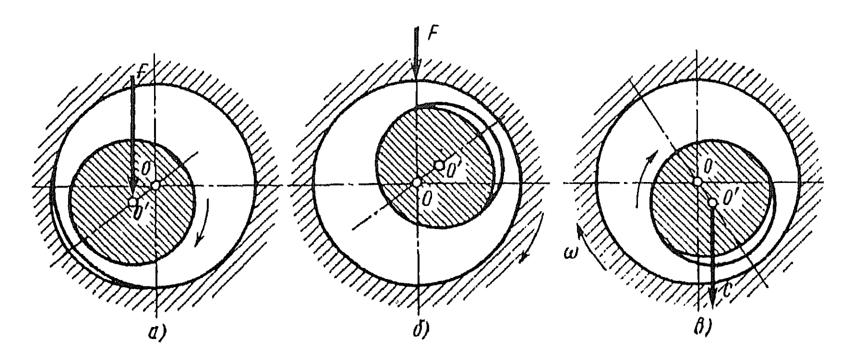


Рис. 16.1. **Вращательные пары второй группы:**
а — циркуляционное нагружение вала и местное нагружение подшипника; *б* — вращающийся подшипник нагружен постоянной радиальной силой *F*, вал неподвижен; *в* — вращающийся вал нагружен постоянной центробежной силой С

риала зона износа подшипника смещена от приложенной силы в направлении, противоположном движению, а при жидкостной или полужидкостной смазке — в сторону движения. Если сила, сохраняя постоянство направления, изменяется по величине на различных установившихся режимах работы машины, то в связи с перемещениями по окружности нагруженной области подшипника зона его одностороннего износа расширится. Еще шире будет она при вращении вала попеременно в обоих направлениях. Эффект вращения вала с различной установившейся скоростью аналогичен изменению величины силы.

Если постоянная сила действует на вращающийся подшипник при неподвижном вале (рис. 16.1, *б*) или центробежная сила нагружает вращающийся вал при неподвижном подшипнике (рис. 16.1, *в*), то подшипник изнашивается равномерно по окружности в любом поперечном сечении, а вал — односторонне.

Сказанное относится к деталям с идеальной цилиндрической рабочей поверхностью, точно смонтированным в узле и недеформирующимся под нагрузкой. На рис. 16.2 показано влияние макроотклонений в виде бочкообразности на форму изнашиваемых поверхностей при циркуляционной нагрузке на шейку вала. *АБВ* — образующая растачивания. Начальное положение вала показано штриховыми линиями. При начальном сопряжении цилиндрической шейки с расточенным бочкообразно подшип-

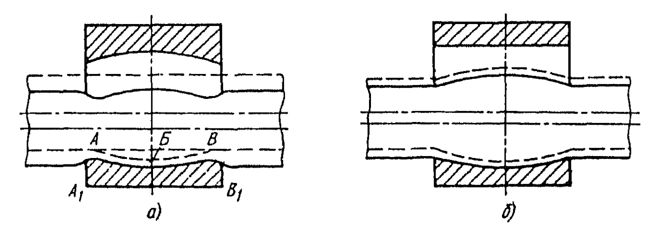


Рис. 16.2. **Влияние бочкообразности одного из элементов вращательной пары на конфигурацию деталей**

ником (рис. 16.2, *а*) вал контактирует с поверхностью подшипника только на площадках вблизи точек А и В, откуда начинается осесимметричный износ вала и местный износ подшипника. По мере износа область контакта по длине расширяется вплоть до полного контактирования по всей длине подшипника. Рабочие поверхности деталей в осевых сечениях приобретают форму A_1B_1— кривых двоякой кривизны.

Бочкообразная шейка (рис. 16.2, *б*) начинает изнашивать подшипник с середины. Если бочкообразность мала и контакт происходит по всей длине шейки при большей деформации посередине, то изнашивание протекает по всей длине, но с большей интенсивностью посередине. Бочкообразность вала уменьшается с ростом пути трения, а подшипник в зоне нагружения приобретает вогнутость по длине. Нетрудно получить представление об эффекте, производимом перекосом осей и деформацией шейки под изгибающей нагрузкой.

В зависимости от условий трения происходит тот или иной вид изнашивания деталей, оставляя следы на материале. По виду и расположению изношенной зоны можно, как показал Н. Типей, определить механизм, вызвавший соответствующий износ [5]. Для подшипника скольжения трение при гидродинамической смазке не должно вызывать повреждений поверхности; в состоянии покоя контакт шипа и вкладыша происходит на узкой площадке контакта (рис. 16.3). Износ подшипника в этом месте незначителен и возможен лишь при недостаточной вязкости масла или больших нагрузках, действующих в начале работы. Если к этому добавить корродирующее действие какого-либо агента, то изношенная поверхность приобретает гладкость и блеск. На поверхности можно заметить исчезновение легко реагирующих составляющих (например, свинца). При наличии абразива поверхность становится матовой.

Как уже упоминалось, в результате отсутствия в подшипнике смазочного материала зона износа подшипника смещается в направлении, противоположном движению. На рис. 16.4 показана зона износа (заштрихована) подшипника при трении без смазочного материала. Коррозия подшипника смещает место износа в сторону вращения (рис. 16.5). Абразивное изнашивание подшипника вызывает появление на поверхностях трения рисок. Износы велики и могут в 30 раз превосходить коррозион-

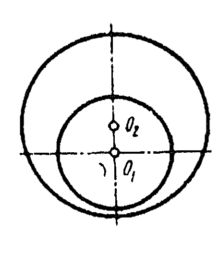


Рис. 16.3. **Неподвижное положение подшипника**

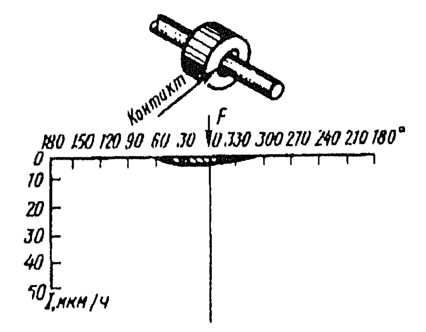


Рис. 16.4. **Расположение зоны износа**

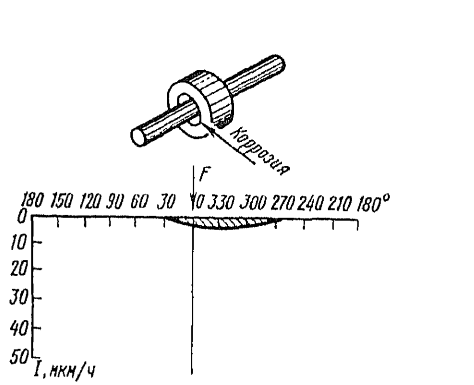


Рис. 16.5. **Расположение коррозионного износа**

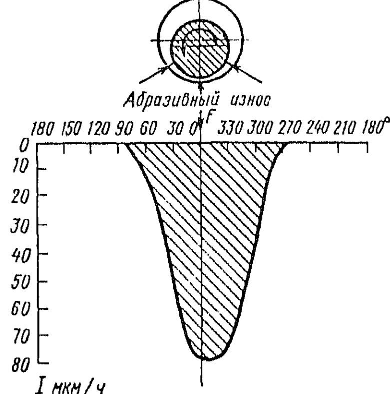


Рис. 16.6. **Расположение абразивного износа**

ный износ. Зона износа находится вблизи контакта поверхностей в состоянии покоя подшипника (рис. 16.6).

Геометрия износа колодочных тормозов определяется главным образом конструкцией подвески и зависит от направления вращения колеса или шкива. Этому вопросу посвящены работы Л.М. Пыжевича [3].

К третьей группе относят вращательные пары с неравномерным износом по окружности обеих поверхностей трения. Разумеется, в нее входят и шарниры, т. е. вращательные пары с углом относительного качания звеньев менее 360°.

Дальнейший анализ рассматриваемых пар нуждается в привлечении векторных или полярных диаграмм нагрузки. Если из произвольной точки как из центра построить векторы равнодействующих радиальных сил, последовательно приложенных к поверхности цапфы или подшипника на протяжении рабочего цикла машины, и противоположные точки соединить, то получим векторную диаграмму давлений на цапфу и подшипник. Простейшие векторные диаграммы имеют элементы вращательных пар второй группы. Так, векторная диаграмма давления на цапфу вращающегося вала, нагруженную постоянной по величине и направлению силой, представляет собой окружность; для подшипника эта диаграмма будет представлять собой точку, радиус-вектор которой равен величине силы, а полярный угол — нулю, причем полярная ось направлена по вектору силы. Наоборот, векторные диаграммы нагрузки цапфы, находящейся под действием центробежной силы и вращающейся со скоростью вала, и неподвижной цапфы, сопрягающейся с вращающимся подшипником под постоянной радиальной нагрузкой, представляют собой точку, а векторные диаграммы давлений на подшипники — окружности.

Используя векторную диаграмму нагрузки, можно построить приближенную картину распределения износа по окружности, известную под названием диаграммы износа. Причиной износа шейки конусной формы является особенность подвода смазочного масла от коренного подшипника к шатунному по наклонному каналу в коленчатом валу (рис. 16.7). Механические частицы, имеющиеся в масле, отбрасываются под действи-

ем центробежной силы к верхней образующей канала, в первую очередь — более крупные частицы, так как мелким труднее преодолеть сопротивление вязкости масла. Выйдя из канала, частицы увлекаются потоком масла, причем значительно большая концентрация частиц имеется на стороне противоположной наклону канала. Тем же потоком механические частицы распространяются и по окружности. Частично происходит их внедрение в баббитовый слой вкладыша, в результате усиливается абразивное изнашивание шейки. Части шейки и подшипника, смазываемые более загрязненным маслом, изнашиваются сильнее.

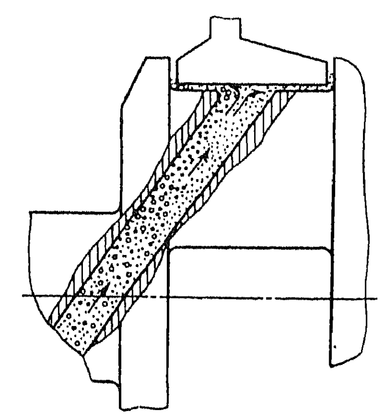


Рис. 16.7. Схема центробежного отделения механических частиц из масла в наклонном масляном канале

Четвертая группа объединяет направляющие скольжения прямолинейного движения столов, суппортов, ползунов и аналогичного типа деталей металлорежущих станков, кузнечно-прессового оборудования, поршневых двигателей и других машин. Условия работы направляющих существенно различаются. В металлорежущих станках встречаются большие длины ходов, скорости скольжения изменяются в широких пределах. Для направляющих кузнечно-прессовых машин характерны большие осевые усилия в направлении перемещения и повышенные температуры. Направляющие крейцкопфов (ползунов) поршневых машин отличаются высокими значениями средних скоростей.

Четвертую группу можно разделить на две подгруппы. В первую входят пары трения с длиной хода большей, чем длина направляющих суппорта (ползуна). Это пары, в которых при неравных площадях трения поверхность меньшей площади все время контактирует с сопряженной поверхностью на различиях ее участках в последовательности, зависящей от назначения и условий использования машины. Износ направляющих станин этой подгруппы по длине неравномерен по различным причинам. В параллелях, служащих направляющими для ползунов, это вызвано переменными давлением и скоростью скольжения по длине хода и особенностями конструкции. В главных судовых поршневых машинах, которые бывают только вертикального исполнения, наибольший износ приходится на среднюю часть, т.е. зону с максимальным силовым воздействием на ползун и со скоростями, близкими к максимальным. У параллелей горизонтальных поршневых машин наблюдается наибольший износ в одной из крайних точек ползуна или равномерный износ по всей длине хода, что объясняется наличием или отсутствием контрштоков у поршней, работой параллелей как балки в зависимости от числа опор и другими причинами.

В металлорежущих станках неравномерность износа по длине бывает связана с особенностями их использования. Например, на универсальном токарном станке обтачиваются в центрах валики различной длины. Так как перемещение суппорта начинается со стороны переднего центра,

независимо от длины вала, то пути трения суппорта по длине направляющих станины будут тем больше, чем ближе сечение к переднему центру.

Вторую подгруппу образуют пары, у которых направляющие станины имеют ограниченную длину, суппорт свешивается с них при своем движении. Номинальная площадь контакта пар непостоянна; вследствие этого, а также в связи с изменениями во взаимном положении приложенных и реактивных сил эпюра давлений переменна на участках свешивания. Если суппорт свешивается с направляющих по обе стороны, то в смысле условий изнашивания станина и суппорт меняются местами. Износ направляющих станины более равномерен при свешивании суппорта.

Расчет формы износа направляющих металлорежущих станков впервые выполнен А.С. Прониковым, у которого мы заимствовали идею объединения пар трения в группы [2].

Пятую группу образуют цилиндры, поршни и поршневые кольца паровых машин, двигателей внутреннего сгорания и компрессоров, цилиндрические золотники, золотниковые втулки и кольца,

Цилиндры вертикальных паровых машин изнашиваются под действием сил упругости поршневых колец и давления пара. В мертвых точках давление пара наибольшее, скорость скольжения равна нулю, а вблизи мертвой точки мала. В середине хода скорость близка к максимальной, давление пара снижается. Распределение износа по длине хода поршня зависит от того, какой фактор (давление на стенку или скорость) является превалирующим в данных условиях изнашивания. При обычной точности изготовления и сборки и нормальной эксплуатации больше изнашивается средняя часть цилиндра, его рабочая поверхность принимает бочкообразную форму. Опытные данные В.С. Семенова указывают на то, что коэффициент трения между кольцом и цилиндром возрастает при прочих равных условиях с увеличением скорости [4].

Моторесурс двигателей внутреннего сгорания определяется обычно ресурсом цилиндропоршневой группы, зависящим от износостойкости деталей этой группы. Пыль, попадающая вместе с воздухом в цилиндры, частицы нагара и продукты износа вызывают абразивное разрушение рабочих поверхностей цилиндров и поршневых колец. Давление газов в цилиндре, а следовательно, и давление поршневых колец на стенки цилиндра имеет наибольшие значения в верхней его части, где условия смазывания неблагоприятны и поверхности трения имеют повышенную температуру. Поэтому в четырехтактных двигателях и двухтактных с прямоточной продувкой зона наибольшего износа цилиндров находится против газоуплотнительных колец в положении поршня в ВМТ, а наибольший износ — против верхнего кольца.

О характере диаметрального износа цилиндров четырехтактных двигателей по их высоте дает представление рис. 16.8. Наибольший диаметральный износ иногда может сместиться несколько вниз от крайнего верхнего положения первого кольца; это произойдет, если кольцо при заедании в канавке или по другим причинам не выполняет функций уплотнения, и закольцевое пространство второго кольца оказывается под наибольшим давлением газов.

Распространено мнение, что цилиндры тронкового двигателя должны изнашиваться. более всего в плоскости движения шатуна, в которой

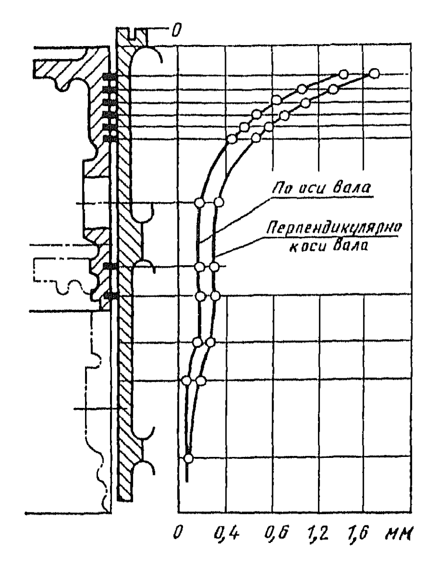


Рис. 16.8. **Кривые диаметральных износов цилиндровой втулки четырехтактного двигателя**

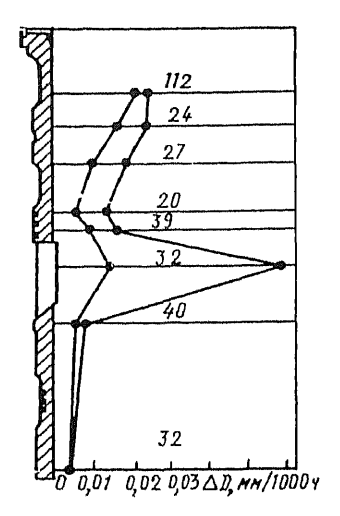


Рис. 16.9. **Статистические кривые диаметральных износов рабочих втулок двухтактного судового дизеля**

поршень прилегает к цилиндру; наименьшим считают диаметральный износ в плоскости оси коленчатого вала. Кривые диаметрального износа цилиндра (рис. 16.8) и другие измерения как-будто подтверждают это. На самом деле верхняя часть рабочей втулки не соприкасается с тронком поршня, контактирование происходит в средней и нижней частях цилиндра. В средней части цилиндра работа сил трения колец поршня заметно превышает работу сил трения поршня. Только в нижней части цилиндра, где износ невелик, более существенной может оказаться роль трения поршня. К тому же факты указывают на другие возможные картины неравномерного распределения износа по поперечному сечению цилиндра. Представление о превалировании диаметрального износа в плоскости движения шатуна несостоятельно.

Иногда обнаруживается еще один максимум износа; он находится в районе первого поршневого кольца в положении НМТ. Бочкообразный износ цилиндров наблюдается в автотракторных двигателях при работе на загрязненном масле, когда абразивные частицы забрасываются на зеркало цилиндра, и в крупных судовых дизелях при недостаточном количестве смазочного материала вследствие конструктивных недоработок смазочной системы.

На рис. 16.9 приведены статистические кривые диаметральных износов ΔD в двух взаимно перпендикулярных плоскостях рабочих втулок двухтактного судового дизеля 8ДР 43/61 с поперечной продувкой (диаметр цилиндра 430 мм, ход поршня 610 мм). Проставленные на горизонталях цифры указывают число втулок, по замерам диаметров которых были получены исходные данные. Средние скорости изнашивания на уровне ВМТ в плоскости вращения шатуна и по оси коленчатого вала почти равны. По мере продвижения вниз разность между износами

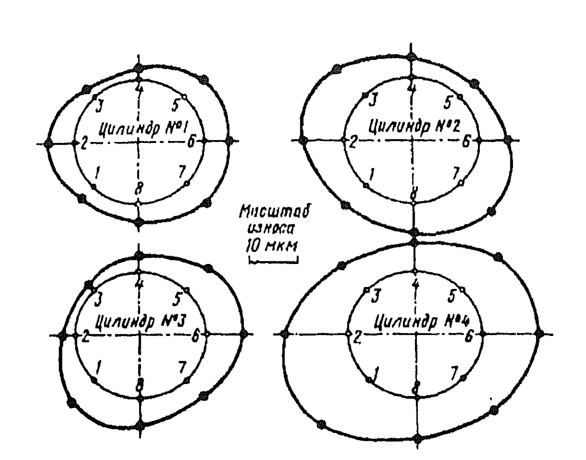


Рис. 16.10. **Диаграммы радиального износа верхнего пояса цилиндровых втулок** *(2—6* **плоскости движения шатуна)**

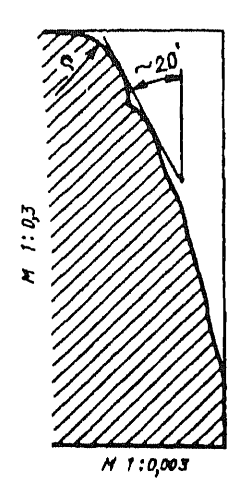


Рис. 16.11. **Профиль поперечного сечения изношенного поршневого кольца**

перпендикулярно оси вала и по его оси увеличивается. Наибольший износ отмечается на перемычках выпускных окон. Это объясняется тем, что даже при охлаждении перемычек трение на них происходит при полужидкостной смазке; к тому же смазочное масло загрязнено частицами нагара, оседающими из отходящих газов. Частицы нагара и продукты износа при восходящем ходе поршня с перемычек попадают на втулку, в результате износ во всех поясах над окнами, за исключением самого верхнего, больше в плоскости вращения шатуна. Верхний пояс только в 51% случаев имел больший износ по этому диаметру. В самом нижнем поясе оба износа одинаковы. Более точную картину распределения износа дают радиальные измерения с помощью специального нутромера и методы определения местного износа.

Для показа характера радиального износа цилиндра воспользуемся некоторыми результатами стендовых испытаний четырехтактного четырехцилиндрового дизеля 4Г17 5/24, полученными А.А. Старосельским, А.А. Вассерманом и В.С. Семеновым [4].

На рис. 16.10 даны диаграммы радиального износа цилиндровых втулок в поясе вблизи ВМТ. Асимметрия износа поверхности трения рабочих цилиндров двигателей внутреннего сгорания обусловлена несимметричностью температурного поля втулки или цилиндра, различной степенью воздействия абразивных частиц на поверхность трения и условиями смазывания.

Неравномерность износа цилиндра по высоте и действие абразивных частиц, естественно, приводят к неравномерности износа поршневых колец. Профиль попереч-ного сечения изношенного кольца приведен на рис. 16.11.

Шестая группа — винтовые пары. Это, в первую очередь, передача винт — гайка. Среднее давление в паре трения передаточный винт — гайка мало. Распределение износа в радиальном направлении связано с деформацией деталей под нагрузкой, а по длине — с раздачей усилий по

виткам гайки и изменениями в раздаче с течением времени. Достаточные сведения о характере микроизменения поверхностей трения отсутствуют.



Рис. 16.12. **Износ боковой поверхности зубьев с увеличенной глубиной фланка:**
1 – теоретический контур; *2* – контур изношенной боковой поверхности

К седьмой группе относят зубчато-винтовые передачи. Изменение конфигурации зубьев при недостаточной твердости материала рабочих поверхностей рассматривалось в гл. 8, в дальнейшем предполагаем, что пластическая деформация визуально не обнаруживается.

Неравномерность износа зубьев цилиндрических прямозубых колес по длине обусловлена неравномерным распределением нагрузки, вызванным упругими деформациями валов и колес, упругими смещениями подшипников и их неравномерной выработкой, несимметричным расположением венца относительно ступицы и погрешностями обработки и сборки деталей передачи. Зуб бокового эвольвентного профиля тоже изнашивается неравномерно, в соответствии с различными величинами удельной скорости скольжения и сил трения по профилю, а также с погрешностями его изготовления.

На рис. 16.12 показан профиль зуба с увеличенной глубиной фланка, искаженный в результате изнашивания. У вершины зуба расположен участок, не участвовавший в зацеплении. Если теоретический коэффициент перекрытия лишь немного более единицы, то с течением времени, как отмечает А.И. Кораблев, он может стать менее единицы, зацепление становится кромочным [1]. Это обусловливает образование продольных углублений в основаниях зубьев (см. рис. 16.12). В результате износа зубьев радиусы их кривизны могут уменьшиться, отчего в соответствующих участках профиля зуба контактные напряжения становятся выше предела контактной выносливости при достаточном начальном запасе прочности.

В тихоходных передачах с коэффициентом перекрытия, близким к единице, наиболее интенсивно изнашиваются зоны с наибольшей удельной скоростью скольжения, а именно участки входа и выхода из зацепления. При значительном абразивном износе зубья срабатываются до полного заострения. В коробках передач с передвижными блоками шестерен наблюдается усиленное изнашивание с заметным утонением зуба со стороны входа в зацепление.

Непостоянство момента сил сопротивления по углу поворота ведомого колеса является особой причиной неравномерного износа зубьев. Большое влияние на эту неравномерность могут оказать упругие колебания в системе даже при почти постоянных моментах движущихся сил и сил сопротивления. На одном судовом редукторе был случай неравномерного износа зубьев с двумя пиками на двух зубьях в результате действия осевых и крутильных колебаний.

В червячных передачах зубья колеса изнашиваются в большей степени, чем витки червяка. Износ сосредоточивается на участках с неблагоприятными условиями смазывания. Эта зона расположена на стороне выхода червяка из зацепления у ножки зуба.

ЛИТЕРАТУРА

К введению в триботехнику

1. **Автоматизированные** смазочные системы и устройства. Авт. коллектив. М.: Машиностроение, 1982. 175 с.
2. **Амбрустер М., Инглебер Ж.** Обзор трибологии во Франции // Тр. 3-го Международного симпозиума по трибологии. Фрикционные материалы. Яроф-ти–97. Ярославль; ОАО НИИАТИ. Фирма ТИИР. С. 302—310.
3. **Ахматов А.С**. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
4. **Бахадур С**. Экономическое значение износа материалов в современном обществе // Проблемы трения и смазки. 1978, № 2. С. 1—4.
5. **Белый В.А., Врублевский В.И., Купчинов Б.И.** Древеснополимерные конструкционные материалы и изделия. Минск: Наука и техника, 1980. 278 с.
6. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника. М.: Машиностроение. 1985. Глава 22. С. 380—402.
7. **Гаркунов Д.Н., Поляков А.А.** Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов. М.: Машиностроение. 1974. 200 с.
8. **Гаркунов Д.Н., Поляков А.А., Семенов В.Я.** Современные проблемы триботехники // Трение и износ. 1980, № 3. С. 391—402.
9. **Грязнов Б.Т., Зенкин А.Н., Прудников В.В.** и др. Технологические методы повышения долговечности машин микрокриогенной техники. Новосибирск: Изд-во Наука, 1999. 271 с.
10. **Джост П.** Будущее трибологии // Трение и износ. 1991. № 3. С. 10—15.
11. **Джост П.** Мировые достижения в области трибологии // Трение и износ. 1986. Т. 7, № 4. С. 593—603.
12. **Домнин С.Г., Коган Ф.М., Щербаков С.В.** и др. Сравнительная гигиеническая оценка асбестовых и безасбестовых фрикционных материалов // Труды 3-го Международного симпозиума по трибологии фрикционных материалов. Изд. ОАО «НИИАТИ Фирма ТИИР», 1997, Ярославль. С. 218—221.
13. **Дроздов Ю.Н., Арчегов В.Г., Смирнов В.И.** Противозадирная стойкость трущихся тел. М.: Наука, 1981. 137 с.
14. **Дубинин А.Д.** Энергетика трения и износа деталей. Москва—Киев: Машгиз, 1963. 153 с.
15. **Евдокимов В.Д., Семов Ю.И.** Экзоэлектронная эмиссия при трении. М.: Наука, 1973. 181 с.
16. **Елизаветин М.А., Сатель Э.А.** Технологические способы повышения долговечности машин. М.: Машиностроение, 1979. 438 с.
17. **Зайцев А.К.** Основы учения о трении, износе и смазке машин. М.: Машгиз, 1947. Ч. 2. 219 с.
18. **Защита от водородного износа** в узлах трения // Сб. статей; Под ред. А.А. Полякова. М.: Машиностроение, 1980. 133 с.
19. **Измеров Н.Ф., Еловская Л.Т., Бармистрова Т.Б.** К вопросу гигиенической и экологической оценки асбеста в производствах асбестотехнических изделий // Тр. 3-го Международного симпозиума по трибологии фрикционных материалов. Ярославль: Изд. ОАО «НИИАТИ Фирма ТИИР», 1997. С. 42—52.

20. **Ишлинский А.Ю., Крагельский И.В., Алексеев Н.М.** и др. Проблемы изнашивания твердых тел в аспекте механики // Трение и износ. 1986. № 4. С. 581—592.
21. **Колесников В.И., Тер-Оганесян В.И., Челохян А.В.** К вопросу о влиянии предварительного наводороживания стали на ее износостойкость при работе в среде незакрепленного абразива // Трибоника и антифрикционные материалы. Новочеркасск, 1980. С. 60—61.
22. **Конвисаров Д.В.** Трение и износ металлов. М.: Машгиз, 1947. 182 с.
23. Коробов **Ю.М., Прейс Г.А.** Электромеханический износ при трении и резании металлов. Изд-во «Техника», Киев: 1976. 196 с.
24. **Кузнецов В.Д.** Физика твердого тела. Томск.: Полиграфиздат, 1947. Т. 4. 542 с.
25. **Лихтман В.И., Ребиндер П.А., Щукин Е.Д.** Физико-химическая механика материалов. М.: Изд. АН СССР. 162. 363 с.
26. **Луканин В.Н., Трофименко Ю.В.** Экологическое воздействие автомобильных двигателей на окружающую среду // Итоги науки и техники. Автомобильный и городской транспорт. Т. 17. 1993. С. 3—134.
27. **Орлов П.И.** Смазка легких двигателей. М.: ОНТИ, 1937. 420 с.
28. **Основы** трибологии. / Под ред. А.В. Чичинадзе. Изд. Центр «Наука и техника». Глава 14. С. 746—770.
29. **П. Ван Донкилаар.** Влияние картерной смазки и горючей смеси на окружающую среду.: Практическая трибология. Т. 2 / Под ред. А.В. Чичинадзе. Центр «Наука и техника». М., 1994. С. 382—384.
30. **Поверхностная** прочность материалов при трении / Под ред. Б.И. Костецкого. Киев: Техника, 1976. 291 с.
31. **Постников С.Н.** Электрические явления при трении и резании. Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1975. 280 с.
32. **Проников А.С.** Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 590 с.
33. **Решение** иодсекции «Трибология на транспорте» Международного конгресса «Экологические проблемы больших городов» / Эффект безызносности и триботехнологии. № 1. 1997. С. 7—8.
34. **Решетов Д.Н.** Работоспособность и надежность деталей машин. М.: Высшая школа, 1974. 205 с.
35. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 209 с.
36. **Словарь**-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Л.К. Шведов, Д.Я. Ровинский, В.Д. Зозуля, Э.Д. Браун. Киев: Наукова думка, 1979. 185 с.
37. **Старосельский А.А., Гаркунов Д.Н.** Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1967. 394 с.
38. **Тейбор Д.** Износ. Краткий исторический обзор / Пер. с англ. — Проблемы трения и смазки. 1977. № 4. С. 6—10.
39. **Тененбаум М.М.** Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 270 с.
40. **Трение** и износ материалов на основе полимеров / Белый В.А., Свириденок А.И., Петраковец М.И. и др. Минск.: Наука и техника, 1976. 430 с.
41. **Трение**, изнашивание и смазка / Справочник в 2-х томах / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978.
42. **Холински Р.** Новые добавки, контролирующие трение, — вклад в создание экологически чистых композиций для тормозных накладок // Тр. 3-го Меж-

дународного симпозиума по трибологии фрикционных материалов. Ярославль: Изд. ОАО «НИИАТИ Фирма ТИИР», 1997. С. 50—52.

43. **Хрущов М.М.** Развитие учения об износостойкости деталей мишан // Сб. Теоретические основы конструирования машин. М.: Государственное научно-техническое изд-во машиностроительной литературы, 1957. С. 282—299.
44. **Швецова Е.М., Крагельский И.В.** Классификация видов изнашивания поверхностей деталей машин в условиях сухого и граничного трения // В сб. статей Трение и износ в машинах, вып. 8. Изд-во АН СССР, 1953. С. 16—38.
45. **Шпеньков Г.П.** Физикохимия трения / Под ред. Д.Н. Гаркунова. Минск: Белорусский госуниверситет, 1978. 204 с.
46. **Электрические** процессы при трении и использование их для борьбы с износом // Тезисы докладов на Всесоюзной научно-технической конференции. Одесса, 1973. 221 с.

К главе 1. Качество поверхности деталей

1. **Демкин Н.Б., Рыжов Э.В.** Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 143 с.
2. **Дунин-Барковский И.В., Карташова А.И.** Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
3. **Дьяченко П.Е.** Современные направления в области обеспечения высокого качества поверхности деталей. М.: Изд-во НТО Машпром. Общественный университет, 1960, 60 с.
4. **Камбалов В.С.** Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974. 112 с.
5. **Шмальц Г.** Качество поверхности // Перевод с нем. под ред. Б.Л. Богуславского. М.: Машгиз, 1941. 333 с.

К главе 2. Физико-химические свойства поверхностей

1. **Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
2. **Боуден Ф.П., Тейбор Д.** Трение и смазка твердых тел / Под ред. И.В. Крагельского. М.: Машиностроение, 1968. 542 с.
3. **Вейлер С.Я., Лихтман В.И.** Действие смазок при обработке давлением. Изд-во АН СССР, 1960. 232 с.
4. **Демкин Н.Б.** Контактирование шероховатых поверхностей. Наука, 1970. 226 с.
5. **Дерягин Б.В.** Что такое трение. Изд-во АН СССР, 1963. 230 с.
6. **Елин Л.В.** Взаимное внедрение поверхностных слоев металлов, как одно из причин изнашивания при несовершенной смазке // Сб. Трение и износ в машинах, № 13. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 267 с.
7. **Кащеев В.Н.** Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение. 1978. 215 с.
8. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968.
9. **Лихтман В.И., Ребиндер П.А., Карпенко Г.В.** Влияние поверхностно активной среды на процесс деформации металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 208 с.
10. **Лихтман В.И., Ребиндер П.А., Щукин Е.Д.** Физико-химическая механика материалов. М.: Издание АН СССР, 1962. 363 с.

11. **Манасевич А.Д.** Физические основы напряженного состояния и прочности металлов. М.: Машгиз, 1962. 198 с.
12. **Окисление** металлов. Пер. с франц. / Под редакцией Г.С. Викторовича. М.: Изд-во Металлургия. 1968. 498 с.
13. **Ребиндер П.А.** Задачи физико-химической механики // Физико-химическая механика. № 1. 1965.
14. **Хольм Р.** Электрические контакты. Изд-во Иностранная литература. 1961. 463 с.

К главе 3. Виды трения в узлах машин

1. **Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
2. **Боуден Ф.П., Тейбор Д.** Трение и смазка твердых тел / Под ред. И.В. Крагельского. М.: Машиностроение, 1968. 542 с.
3. **Верховский А.В.** Явление предварительного смещения при трении несмазанных поверхностей с места. Журнал прикладная физика. № 3. 1926. С. 311—315.
4. **Виноградов В.Г.** Некоторые новые пути получения и исследования смазочных материалов // Труды III Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т. III. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 165—172.
5. **Коровчинский М.В.** Теоретические основы работы подшипников скольжения. М.: Машгиз, 1959. 402 с.
6. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
7. **Крагельский И.В., Виноградова И.Э.** Коэффициенты трения. М.: Машгиз, 1962. 219 с.
8. **Петров Н.П.** Описание результатов опытов над трением жидкостей и машин // Изв. СПб технологич. Института, 1891.
9. **Петрусевич А.И.** Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки. М.: Изв. АН СССР, № 2, 1951. С. 209—253.
10. **Решетов Д.Н.** Работоспособность и надежность деталей машин. М.: Высшая школа, 1974. 205 с.
11. **Тябин Н.В.** Реодинамическая теория вязко-пластической смазки // Тр. 3-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т. 3. Изд. АН СССР. С. 134—146.
12. **Hersey M.D.** Trans. ASME, vol. 37, 1915, p. 167.

К главе 4. Механизм изнашивания деталей пар трения и рабочих органов

1. **Акулич Н.В.** Получение и исследование свойств антифрикционных композиций на основе эпоксифурановых олигомеров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Уральский лесотехнический институт. Свердловск, 1975. 22 с.
2. **Гаркунов Д.Н.** Влияние отношения поверхностей трения на износ // Докл. АН СССР. 1955. 104, № 2. С. 227—228.
3. **Гаркунов Д.Н., Поляков А.А.** Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов. М.: Машиностроение, 1974. 200 с.
4. **Грозин Б.Д., Семирог-Орлик В.Н.** Определение механических свойств высокопрочных сталей методом всестороннего неравномерного сжатия. Киев: НТО Машпром, 1956, 16 с.

5. **Дьяченко П.Е.** Современные направления в области обеспечения высокого качества поверхности деталей // Изд. НТО. Машпром. Общественный университет. М.: 1960. 60 с.
6. **Евдокимов В.Д.** Реверсивность трения и качество машин. Киев: Техника, 1977. 145 с.
7. **Евдокимов В.Д., Семов Ю.И.** Экзоэлектронная эмиссия при трении. М.: Наука, 1973. 181 с.
8. **Евдокимов Ю.А., Тер-Оганесян В.И., Колесников В.И.** Исследование влияния направления электрического поля в зоне контакта на износ металлополимерной пары трения // Тез. докл. на Всесоюзном семинаре «Влияние качества поверхности на эксплуатационные свойства подвижных сопряжений машин. Рыбинск: 1979. С. 96—98.
9. **Кащеев В.Н.** Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 211 с.
10. **Конвисаров В.Д.** Трение и износ металлов. М.: Машгиз, 1947. 182 с.
11. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение. 1968. 480 с.
12. **Кузнецов В.Д.** Избр. тр. / Физика резания и трения металлов и кристаллов. М.: Наука, 1977. С. 105—165.
13. **Курлов О.Н.** Исследование и обоснование путей возбуждения избирательного переноса в узлах трения машин // В кн. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 55—58. Наука, 1973. 181 с.
14. **Постников С.Н.** Электрические явления при трении и резания металлов. Горький: Волжско-вятское книжное изд-во, 1975. 279 с.
15. **Протасов Б.В.** Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности. Изд-во Саратовского университета, 1979. 148 с.
16. **Радчик А.С., Радчик В.С.** О деформациях поверхностных слоев при трении скольжения // Доклады АН СССР. Т. 119, № 5. 1958. С. 933—935.
17. **Рыжкин А.А., Дмитриев В.А., Климов М.М.** и др. Физические основы обработки материалов резанием. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 1996. 352 с.
18. **Свириденок А.И., Савкин В.Г.** Структурная трибомеханика материалов на основе полимеров // Трение и износ. 1980, № 1. С. 150—167.
19. **Старосельский А.А., Гаркунов Д.Н.** Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1967. 394 с.
20. **Трение** и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый, А.И. Свириденок, М.И. Петраковец и др. Минск: Наука и техника, 1976. 430 с.
21. **Хрущов М.М., Курицина А.Д.** Исследование изменений в строении рабочей поверхности баббита в процессе трения и изнашивания // Сб. «Трение и износ в машинах», № 5. М.: Изд-во АН СССР, 1953. С. 34—40.
22. **Швецова Е.М., Крагельский И.В.** Классификация видов изнашивания поверхностей деталей машин в условиях сухого и граничного трения // Сб. «Трение и износ в машинах», вып. 8. Изд-во АН СССР, 1953. С. 16—38.
23. **Pursche G.** Neue grundlegende Uberlegungen zum Werkstoff Verschleiss, — Technik, 1972, Jg. 27. 452—462 c.
24. **Thiessen P.A., Meyer K., Heinicke G.** Grundlagen der Tribochemie. — Berlin: Akademie-Verlag, 1967, 267 s.
25. **Fink M.** Wear Oxidation a New Component of Wear, «Technik» 2, Heft 4, 1947. S. 171—176.

К главе 5. Виды разрушения рабочих поверхностей деталей и рабочих органов машин

1. **Зайцев А.К.** Основы учения о трении, износе и смазке машин. Часть 2. М.: Машгиз, 1947. С. 58—73.
2. **Костецкий Б.И.** Сущность явлений трения и износа в деталях машин // Трение и износ в машинах: Тр. 2-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т. 4. М.: Изд-во АН СССР. 1951. С. 201—208.
3. **Старосельский А.А., Гаркунов Д.Н.** Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1967. 394 с.
4. **Швецова Е.М., Крагельский И.В.** Классификация видов разрушения поверхностей деталей машин в условиях сухого и граничного трения // В кн.: Трение и износ в машинах, вып. 8. М.: АН СССР, 1953. С. 16—38.

К главе 6. Водородное изнашивание

1. **Аксенов А.Ф., Назаренко П.В., Макаркин А.Н.** Исследование пластической деформации стали 45 при трении в среде газообразного водорода // Сб. Проблемы трения и изнашивания. Киев: Техника, 1979. Вып. 15. С. 59—62.
2. **Андрейчик М.А., Матюшенко В.Я.** Некоторые аспекты технологического наводороживания металлов и его влияние на износостойкость // Долговечность трущихся деталей машин. М.: 1985. Вып. 1. С. 191—195.
3. **Арчаков Ю.И.** Водородоустойчивость стали. М.: Металлургия, 1978. 149 с.
4. **Белый В.А., Врублевский В.И., Купчинов Б.И.** Древеснополимерные конструкционные материалы и изделия. Минск: Наука и техника, 1980. 278 с.
5. **Беспрозванных Л.В., Васильева Л.А., Кириенко О.Ф.** и др. Исследование механизма изнашивания коррозионно-стойкой стали в водороде // Эффект безызносности и триботехнологии. № 1. 1993. С. 57—63.
6. **Беспрозванных Л.В., Соколов Ю.Д., Федорущенко А.А.** Оценка влияния газообразного водорода на трение и изнашивания сталей // Физико-механическая механика материалов. 1982. Т. 18. № 5. С. 119—121.
7. **Библиографический** указатель опубликованной литературы за 1956—1985 гг. по избирательному переносу при трении и водородному изнашиванию: Изд. 3-е, доп. АН СССР. Библиотека по естественным наукам. Отдел БЕН в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова. М., 1986. 293 с.
8. **Бородулин М.М., Васильев И.И., Царева Т.Г.** Водородный износ в автомобильных тормозах. В кн.: Исследование водородного износа. М.: 1977. С. 19—17.
9. **Випф Х.** Электро- и термоперенос в системах металл—водород: В кн.: Водород в металлах. Т. 2. Прикладные аспекты / Под редакцией Г. Алефельда и И. Фельеля. Мир. С. 327—359.
10. **Воронков Б.Д., Шадрин В.Г.** Повышение срока службы рабочих органов бисерных мельниц в условиях водородоабразивного изнашивания // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 2. 1986. С. 186—194.
11. **Гаркунов Д.Н.** Повышение износостойкости деталей машин. Киев: Машиностроение, 1960. 162 с.
12. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
13. **Гаркунов Д.Н., Суранов Г.И.** О способе повышения долговечности колесных и тормозных пар // Эффект безызносности и триботехнологии. № 1, 1998. С. 32—36.

14. **Гаркунов Д.Н., Суранов Г.И., Коптяева Г.Б.** О природе повышения износостойкости деталей и инструмента магнитной обработкой // Трение и износ. 1982. Т. 3. № 2. С. 327—330.
15. **Георгиевский Г.А., Олина Я.О.** О намазывании и схватывании при трении пластмасс по чугуну // Вопросы трения и проблемы смазки. М.: Наука, 1968. С. 127—131.
16. **Гольдфайн В.И., Зуев А.М., Каблуков А.Г.** и др. Влияние окисления и наводороживания на трение и износ титановых сплавов // В кн.: Исследование водородного износа. М.: Наука, 1977. С. 71—80.
17. **Гороховский Г.А.** Методика и результаты исследования изнашивания элементов пар трения металл—пластмасса при сухом и граничном трении // В сб.: Трение, смазка и износ деталей машин. Вып. 2. Киев: Институт гражданской авиации, 1961. С. 43—55.
18. **Евдокимов В.Д., Семов Ю.И.** Экзоэлектронная эмиссия при трении. М.: Наука, 1973. 180 с.
19. **Закрачински Т.** Проникновение электролитического водорода в железо и сталь и его влияние на механические свойства металла // Защита металлов. Т. XIX. № 5. 1983. С. 733—739.
20. **Защита** от водородного износа в узлах трения / Под ред. А.А. Полякова. М.: Машиностроение, 1980. 135 с.
21. **Исследования** водородного износа / Под ред. А.А. Полякова и Ю.С. Симакова. М.: Наука, 1977. 84 с.
22. **Коррозия** и защита химической аппаратуры // Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность / Под ред. А.М. Сухотина, А.В. Шрейдера и Ю.А. Арчакова. М.: Химия. Т. 9. 406 с.
23. **Крагельский И.В.** Трение и износ. Изд. 2-е. М.: Машиностроение, 1968. 479 с.
24. **Кудинов В.А.** Температурная задача трения и явление наростообразования при резании и трении // Тр. 3-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т. 2. Изд. АН СССР. 1969. С. 207—216.
25. **Кузнецов В.Г.** Влияние коррозии и состава смазок на контактную выносливость // Сб.: Контактная прочность машиностроительных материалов. М.: Наука, 1964. С. 167—172.
26. **Куцер Э.В.** Исследование разогрева деталей металлополимерных узлов трения с локальным силовым контактом: Автореф. дисс. конд. техн. наук. Тбилиси, 1969.
27. **Матюшенко В.Я.** Износостойкость наводороженных металлов // В кн.: Исследование водородного износа. М.: Наука, 1977. С. 24—27.
28. **Матюшенко В.Я.** Исследования наводороживания металлов при трении с фрикционными пластмассами: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова. М., 1974. 21 с.
29. **Матюшенко В.Я., Шпеньков Г.П.** Методика исследования содержания водорода в стальных поверхностях трения // В кн.: Физико-химическая механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 1971. С. 62—64.
30. **Матюшенко В.Я., Соловей Н.Ф., Тороп В.В.** Исследование водородного износа цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания // Эффект безызносности и триботехнологии. № 1. 1997. С. 33—39.
31. **Научное** открытие [Диплом № 378] // Явление образования насыщенной водородом зоны в подповерхностном слое металлов при трении (явление

водородного изнашивания металлов) / А.А. Поляков, Д.Н. Гаркунов, Г.П. Шпеньков, В.Я. Матюшенко. Открытия, изобретения. 1990. № 30.

32. **Памфилов Е.А., Петренко Н.М.** К вопросу о механизме изнашивания дереворежущего инструмента. Изв. вузов, лесной журнал, 1978, № 3. С. 148—150.
33. **Патент** 17906114 А3 СССР, МКИ С21 Д 1/04 // Способ обработки деталей пар трения / Суранов Г.И., Гаркунов Д.Н. (СССР). № 4889246/02; Заявл. 10.12.90.
34. **Перевознюк В.А.** О магнитометрическом исследовании трения скольжения // Трение и износ. 1984. Т. 5. № 1. С. 170—172.
35. **Польцер Г., Фирковский А., Ланге И.** и др. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 5. Машиностроение, 1990. С. 86—122.
36. **Поляков А.А., Гаркунов Д.Н.** Водород как ускоритель износа // Вестник Машиностроения, 1974, № 6. С. 59.
37. **Присевок А.Ф.** Теоретические и технологические основы формирования газотермических и водородостойких покрытий: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. БГПА. Минск, 1998. 35 с.
38. **Присевок А.Ф., Беляев Г.Я., Козловский Н.Н.** Методы защиты изнашивания узлов трения машин и оборудования микробиологического и медицинского производств // Эффект безызносности и триботехнологии. № 1. 1998. С. 37—40.
39. **Ротенберг З.А.** Гидратированный электрон в химии. «Знание». «Новое в жизни, науке и технике»: Серия «Химия». № 12. 1979. 63 с.
40. **Соловей Н.Ф.** Влияние наводороживания трущихся деталей ДВС и разработка методов его устранения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Калининский политехн. институт. Калинин, 1985. 21 с.
41. **Станчук Э.А., Шумилов А.П.** Водород как технологический фактор в процессах механообработки // Тез. докл. на Всесоюзном симпозиуме «Водород в металлах». Донецк, 1982. С. 110—111.
42. **Суранов Г.И.** О механизме наводороживания металлов при деформировании и трении // Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. Вып. 2. 1986. С. 186—194.
43. **Суранов Г.И.** О механизме снижения водородного изнашивания деталей магнитной обработкой // Эффект безызносности и триботехнологии. № 2. 1992. С. 27—31.
44. **Технический** анализ / Авт.: Голдовская Н.И., Рябина Л.В., Новик Е.Ю. и др. М.: Высшая школа, 1967. 403 с.
45. **Туннельный** эффект в твердых телах / Издано Л. Барстейн и С. Лундквист. Пленум-прейсс. Нью-Йорк, 1969.
46. **Утц Н., Зоммер К., Рихтер К.** Общие представления о процессах в поверхностных слоях при сухом трении стали по стали // В кн.: Теория трения, износа и проблемы стандартизации. Приокское книжное изд-во. Брянск, 1978. С. 90—110.
47. **Фрейдлин М.Г., Гаркунов Д.Н., Гавзе А.Л.** и др. Влияние фазового состава на антифрикционные свойства титановых сплавов при трении со смазкой // Исследование водородного износа. М.: Наука, 1977. С. 67—71.
48. **Хайнике Г.** Трибохимия. Мир, 1987. С. 584.
49. **Харитонов В.В., Шпеньков Г.П., Матюшенко В.Я.** Электрохимические процессы при трении и использование их для борьбы с износом. Одесса: ВСНТО, 1973. С. 208—212.

50. **Челохьян А.В., Колесников В.И., Тер-Оганесян Б.И.** Влияние поляризации стали на процесс наводороживания и износостойкость в коррозионно-активной среде // Сб.: Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 2. Машиностроение, 1986. С. 163—170.
51. **Шаповалов В.И., Карпов В.Ю.** Явление анормальной пластической автодеформации при термоциклировании Ft—H сплавов // Доклады АН УССР, 1881, № 7. С. 90—94.
52. **Шацберг Р., Фелсон И.М.** Влияние воды на распределение усталостных повреждений и изменения поверхности в условиях смазки при контакте качения // Проблемы трения и смазки / Пер. с англ. М.: Мир, 1969. № 2. С. 101—113.
53. **Шехтер Ю.Н., Ребров И.Ю., Юдин В.М.** и др. Влияние смазочных масел и присадок на наводороживание, коррозию и износ в статических и динамических условиях // Сб.: Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 5. М.: Машиностроение, 1990. С. 225—253.
54. **Шпеньков Г.П.** Физикохимия трения. Минск: Изд. Университетское, 1991. 395 с.
55. **Шпеньков Г.П.** Физикохимия трения // Применительно к избирательному переносу и водородному износу. Минск: Изд-во БГУ, 1978. 204 с.
56. **Юдин В.М., Ставровский М.Е., Севанчук Р.В.** и др. Методы исследования водородного изнашивания узлов трения машин и агрегатов // Сб.: Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 5. Машиностроение, 1990. С. 354—354.
57. **Scieszka S.F.** Tribological phenomena in steel composite brake material friction pairc. — Wear, 1981, vol. 64, № 2, p. 367—378.
58. **Saka N. Eleich A.M., Suh N.P.** Wear of metalis at high sliding speeds. Wear. 1977. Vol. 44. № 6. P. 109—126.
59. **Suh N.P.** The delamination treary of wear // Wear. 1973. Vol. 25. № 1. P. 111—124.
60. **Bulluffi R.W.** On measurement of self diffusion rate alond disiocation FCC metalls // Stat. sol. Phys. 1970. Vol. 42. № 1. P. 11—34.
61. **Titn J.K., Tyompson A.U., Bernstein J.M., Ricyars R.J.** Yudrjgen transport by dislocations // Met. Trans. 1976. Vol. 7A. № 6. P. 821—829.
62. **Jonson M.A., Yirth J.P.** Internal Hidrogen super saturation prodductd by dislocation transports // Met. Trans. 1976. Vol. 7A. P. 1543.

К главе 7. Абразивное изнашивание

1. **Барабаш М.Л.** Исследование износа металлов в присутствии органозолей железа // В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев—Москва: Машгиз, 1953. С. 352—358.
2. **Билик Ш.М.** Истирание полимерных материалов при отсутствии смазки // Сб.: Сухое трение. Изд-во АН Латв.ССР. 1961.
3. **Богачев И.Н., Журавлев Л.Г.** Исследование износостойкости сталей при абразивном изнашивании // В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев: Изд-во АН УССР. 1960. С. 92—101.
4. **Бортник Г.И., Ханин Д.Е., Кострома В.В.** Исследование влияния величины зерна абразива на изнашивание металлов при трении в режиме избирательного переноса // В сб.: Электрические процессы при трении и использование их для борьбы с износом. Одесса: НТО, 1973. С. 134—135.

5. **Венцель С.В.** Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания. М.: Химия, 1979. 237 с.
6. **Виноградов В.Н., Сорокин Г.М.** Механическое изнашивание сталей и сплавов. М.: Недра, 1996. 361 с.
7. **Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Пашков А.Н.** Долговечность буровых долот. М.: Недра, 1977. 256 с.
8. **Гаркунов Д., Колесников В.И., Челохьян А.В.** Влияние коррозионноактивных сред на процесс абразивного изнашивания // Трение и износ. 1983. Т. 4. № 5. С. 773—778.
9. **Икрамов У.А.** Расчетные методы оценки абразивного изнашивания. М.: Машиностроение, 1978. 215 с.
10. **Кащеев В.Н.** Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 211 с.
11. **Клейс И.Р.** Об изнашивании металлов в абразивной струе // Тр. Таллинского политех. Института: Серия А, № 168, 1959. С. 3—27.
12. **Коган А.М., Соболев Д.Я.** О некоторых методах и результатах оценки износостойкости пластмасс в шахтных конвейерах и вагонетках // Сб.: Пластмассы в машиностроении и приборостроении. Гостехиздат УССР. 1961.
13. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
14. **Львов П.Н.** Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. М.: Машгиз, 1962.
15. **Почтарев Н.Ф.** Влияние запыленности воздуха на износ поршневых двигателей. М.: Воениздат, 1956.
16. **Тененбаум М.М.** Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 71 с.
17. **Тененбаум М.М.** Износостойкость деталей и долговечность горных машин. Гостопиздат, 1960. 246 с.
18. **Ткачев В.Н.** Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. М.: Машиностроение, 1995. 332 с.
19. **Трепенков И.И.** Исследование резино-металлических шарниров // Сб. НАТИ «Элементы механизмов трактора». Вып. 1. Машгиз, 1948.
20. **Хейнике Г.** Трибохимия / Пер. с нем. М.: Мир, 1987. 582 с.
21. **Хрущов М.М., Бабичев М.А.** Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
22. **Groch A.K., Shallamach.** Wear, 4, № 5, 356 (1961).
23. **Welliger K. und Vetz H.** Gleitverschleiss Spulverschleiss Strahlverschleiss under der Wirkung von kornigen Stoffen «VDI–Forschung Htft», 1955, Ausgabe B. Bd. 21, № 449.

К главе 8. Окислительное изнашивание, изнашивание вследствие деформации, диспергирования и выкрашивания

1. **Костецкий Б.И.** Трение, износ и смазка в машинах. Киев: Техника, 1970, 396 с.
2. **Окисление** металлов. Теоретические основы. Т. 1. / Пер. с франц. под ред. Г.С. Викторовича. М.: Металлургия, 1968. 498 с.
3. **Савицкий К.В., Коган Ю.И.** Деформация трением переохлажденного аустенита углеродистой стали // Сб. Трение и износ в машинах. № 15. Изд-во АН СССР, 1962.
4. **Честнов А.Л.** Окисление при трении скольжения // В кн.: Вопросы машиноведения. Изд-во АН СССР, 1950. С. 547—554.

К главе 9. Коррозия, кавитационное и эрозионное изнашивание

1. **Богачев И.Н., Минц Р.И.** Кавитационно-эрозионное разрушение железоуглеродистых сплавов // В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев: Изд-во АН УССР. 1960. С. 36—45.
2. **Карелин В.Я.** Кавитационные явления в центробежных осевых насосах. Машгиз, 1963.
3. **Козырев С.П.** Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1971. 139 с.
4. **Коррозия** (справочник) / Пер. с англ. под ред. В.С. Синявского. М.: Металлургия, 1981. 630 с.
5. **Урванцев Л.А.** Эрозия и защита металлов. М.: Машиностроение, 1966. 233 с.
6. **Эванс Ю.Р.** Коррозия и окисление металлов / Пер. с англ. Машгиз, 1962. 560 с.
7. **Янкевич В.Ф.** О газовой эрозии металлов при воздействии газов высокой температуры // В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев: Изд-во АН УССР. 1956. С. 107—111.
8. **Valckeneers G.A.** Schrofasson en schroefskoners. — «Ship en Werf Powez». 1963, № 3.

К главе 10. Коррозионно-механическое изнашивание в сопряженных деталях машин

1. **Круман Б.Б., Крупицына В.А.** Коррозионно-механический износ оборудования. М.: Машиностроение, 1968. 104 с.
2. **Лосиков Б.В.** Пути защиты от коррозии современных антифрикционных сплавов // Вестник машиностроения, 1955. № 8.
3. **Прейс Г.А., Сологуб Н.А., Некоз А.И.** Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности. М.: Машиностроение, 1979. 207 с.
4. **Старосельский А.А., Белаковский Я.И.** Подшипники судовых валопроводов. Изд-во «Морской транспорт», 1959. 145 с.
5. **Van der Horst I. M.A., Schultze W.A.** «Journal of Engineering for Powez», April 1962 / Transactions of the ASMF. Series A.

К главе 11. Схтывание и заедание поверхностей при трении

1. **Айбиндер С.Б., Пранч А.С.** О механизме возникновения и разрушения сцепления при трении металлов // Тр. 3-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Издание АН СССР. 1960. С. 99—105.
2. **Боуден Ф.П., Тейбор Д.Т.** Трение и смазка твердых тел / Пер. с англ.; Под ред. И.В. Крагельского. М.: Машиностроение, 1968. 542 с.
3. **Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В.** Исследование заедания металлов при трении // Кн.: Повышение износостойкости и сроков машин. Киев, Машгиз, 1956. С. 72—79.
4. **Голего Н.Л.** Схватывание в машинах и методы его устранения. Киев: Изд-во Техника, 1965. 230 с.
5. **Гришко В.А.** Опыт применения метода меченых атомов в исследовании износостойкости зубчатых передач // Передовой научно-технический и производственный опыт. № 3-64-1026/5. Изд-во ГОСИНТИ, 1964.
6. **Гуляев В.Н., Лагунцев И.Н.** Соединение сопряженных металлических деталей при окислении // Сб.: Эксплуатационная надежность металла паросиловых установок. Энергоиздат, 1959.

7. **Дроздов Ю.Н., Арчегов В.Г., Смирнов В.Н.** Противозадирная стойкость трущихся тел. М.: Наука, 1981. 137 с.
8. **Кузнецов В.Д.** Наросты при резании и трении. М.: Гостехиздат, 1956. 284 с.
9. **Лозовский В.Н.** Схватывание в прецизионных парах трения. М.: Наука, 1972. 83 с.
10. **Михалин Г.И.** Задиры поршней и цилиндров дизелей и мероприятия по их предупреждению // Промышленная энергетика. 1960. № 5.

К главе 12. Изнашивание при фреттинг-коррозии

1. **Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В.** Фреттинг коррозия металлов. Киев: Техника, 1974. 268 с.
2. **Филимонов Г.Н., Балацкий Л.Т.** Фреттинг в соединениях судовых двигателей. Изд-во Судостроение, 1973. 295 с.
3. **Уотерхауз Р.Б.** Фреттинг-коррозия / Пер. с англ. Л.: Машиностроение, 1976. 270 с.

К главе 13. Трещинообразование на поверхностях трения

1. **Гаркунов Д.Н.** Повышение износостойкости деталей самолетов. Оборонгиз, 1960. 139 с.
2. **Зильберг Ю.А., Бигиджанова А.П., Хрущов М.М.** Ускоренные испытания на усталость биметаллических образцов с антифрикционными сплавами // Сб. «Усталость металлов». Изд-во АН СССР. 1960. 213 с.
3. **Эрлих Л.Б.** Элементы теории и механизм контактных разрушений // Вестник машиностроения, 1963. № 1. С. 46—52.

К главе 14. Контактная прочность

1. **Гришко В.А.** Опыт применения метода меченых атомов в исследовании зубчатых передач // Передовой научно-технический и производственный опыт. № 3-64-1026/5. Изд-во ГОСНИТИ, 1964.
2. **Трубин Г.К.** Контактная усталость материалов для зубчатых колес. Машгиз, 1962. 402 с.
3. **Пинегин С.В.** Контактная прочность в машинах. М.: Машиностроение, 1965. 246 с.
4. **Решетов Д.Н., Ганулич И.К., Кириллов А.П.** Совершенствование смазки — путь повышения надежности зубчатых передач, Вестник машиностроения, 1981. № 9. С. 5—8.
5. **Dawson P.H.** Effect of Metalle contact on the pitting of lubricated rolling surfaces. — «J. Mech. Engng. Sci, 1962. 14. № 1.

К главе 16. Связь сопротивления усталости деталей с трением и изнашиванием

1. **Грозин Б.Д., Вальчук Г.И.** О некоторых случаях появления трещин на поверхностях шеек коленчатых валов, закаленных токами высокой частоты // В сб. докл. Исследования в области металловедения и контактной прочности металлов. Киев: Машгиз, 1958. С. 5—16.

2. **Драйгор Д.А.** Влияние условий трения на предел усталости стали // В сб. докл. Исследование в области металловедения и контактной прочности металлов. Киев: Машгиз, 1958. С. 26—32.
3. **Лихтман В.И., Ребиндер П.А., Карпенко Г.В.** Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 208 с.
4. **Потак Я.М.** Хрупкие разрушения стали и стальных деталей. Оборониздат, 1955. 386 с.
5. **Старосельский А.А., Гаркунов Д.Н.** Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1967. 394 с.

К главе 17. Распределение износа по поверхности деталей

1. **Кораблев А.И., Решетов Д.Н.** Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач.М.: Машиностроение, 1968. 187 с.
2. **Проников А.С.** Износ и долговечность станков. М.: Машгиз, 1957. 274 с.
3. **Пыжевич Л.М.** Расчет фрикционных тормозов. М.: Машиностроение, 1964. 228 с.
4. **Старосельский А.А., Вассерман, Семенов В.С.** Некоторые результаты испытаний поршневых колец дизелей на износостойкость // Вестник машиностроения. 1961. № 3.
5. **Типей Н., Константинеску В.Н., Ника Ал., Бицэ О.** Подшипники скольжения // Расчет, проектирование, смазка. Издательство Румынской Народной Республики, Бухарест, 1964. 457 с.

ЧАСТЬ II

БЕЗЫЗНОСНОСТЬ

(избирательный перенос при трении)

"Они сошлись. Волна и камень,
Стихи и проза, лед и пламень
Не столь различны меж собой"

А.С. Пушкин

"Противоположности не противоречат, а дополняют друг друга."

Н. Бор

Введение

Если первая часть книги была посвящена вопросам изнашивания деталей машин, различным видам разрушения поверхностей трения, включая и разрушения от циклических контактных нагрузок, то во второй ее части описываются иные процессы — процессы, создающие условия безызносного трения.

Анализ изложенного в первой части позволяет утверждать, что нельзя создать материал для узла трения, который бы в процессе трения не разрушался. Это действительно так. Пословица говорит: "Время и труд все перетрут".

Однако в трущейся паре участвуют два тела и смазка; это не материал, а система. Она может быть закрытой или открытой (в термодинамическом смысле). Открытой тогда, когда эта система может обмениваться с внешней средой энергией и веществом. При открытой системе могут происходить процессы самоорганизации новых структур. И при таких условиях износ трущейся пары может быть снижен до нуля, а трение уменьшиться в 10 раз.

Изложенные в первой части книги такие понятия, как приработка, износ, граничное трение, окисление поверхности как средство предотвращения схватывания поверхностей, продукты износа, равновесная (оптимальная) шероховатость поверхности, усталостные процессы, адгезионная и механическая составляющие при трении, в новых представлениях о трении и износе здесь не представляют интереса и не являются предметом изучения.

Основной тезис второй части книги состоит в доказательстве существования эффекта безызносности, обусловленного тем, что трение может быть не только разрушительным, но и созидательным явлением.

В результате самоорганизующихся процессов при избирательном переносе при трении в зоне контакта самопроизвольно образуется тонкая металлическая не окисляющаяся пленка, которая разделяет трущиеся детали и создает условия безызносности. Трение не может износить пленку — оно ее создает.

Удивительным является то, что пленка образуется в весьма "стесненных" условиях: сдвиговые и пластические деформации, высокие удельные нагрузки и температуры. Здесь силы природы превалируют над отмеченными внешними факторами. В результате "рожденная" в таких условиях пленка обладает особыми свойствами — она пориста и имеет малое число дислокаций и большое количество вакансий; параметр ее кристаллической решетки отличен от параметра решетки металла, полученного металлургическим путем.

Теоретическое объяснение эффекта безызносности следует искать в термодинамической теории необратимых процессов и теории диссипативных структур с присущими им свойствами, напоминающими функции живого организма. Теоретическая схема построения диссипативной структуры апробирована на ряде примеров. Открытие каждой новой конкретной структуры сопровождается трудностями, которые почти всегда вознаграждаются поразительными свойствами, например, свойствами лазерного луча.

Избирательный перенос относится к диссипативной структуре. Это удалось показать в результате слияния различных ветвей физико-химии: явления сверхпластичности, физики тонких металлических пленок, образования в процессе трения в смазочном материале координационных соединений, эффекта Ребиндера и др.

Одним из ярких примеров реализации свойств диссипативной структуры при избирательном переносе является безызносность трущихся деталей компрессора домашнего холодильника. Его трущиеся узлы (поршень и цилиндр, коленчатый вал и сопряженные с ним подшипники) в течение нескольких десятков лет работы не имеют износа.

В процессе работы компрессора поверхности трения его деталей покрываются тонкой пленкой меди, которая разделяет сопряженные детали и создает безызносное трение. Пленка образуется из ионов меди, находящихся в системе охлаждения холодильника. Ионы меди поступают в систему охлаждения в результате растворения имеющихся в ней медных трубок.

Естественно, изложение избирательного переноса не является законченным и его понимание на первых порах будет достаточно трудным для студентов первых курсов и инженеров.

Для того чтобы облегчить понимание излагаемых вопросов в одном из разделов первой главы, даны пояснения о научных дисциплинах, явлениях, терминах и понятиях, необходимых при изучении эффекта безызносности.

Новые ранее неизвестные факты и закономерности создают некоторую атмосферу инакомыслия в триботехнике. Это инакомыслие можно заметить при чтении в первой главе раздела "Постулаты классической ("коммунальной") и натуртриботехники".

К инакомыслию в триботехнике относится и признание того, что одним из главных факторов износа деталей является водород. Благодаря трению на поверхности трущихся деталей образуется диффузионно-способный водород, который диффундирует в поверхностный слой стальной и чугунной детали и разрушает его, создавая в ряде случаев катастрофическую обстановку. Такие виды износа, как абразивный, фреттинг-коррозия, коррозионно-механический, усталостный и др., в большой степени связаны с разрушительным действием водорода. Износ тормозов, рельсов и колес тепловозов и вагонов, рабочих органов сельскохозяйственных машин, деталей оборудования химических производств, узлов трения машин, работающих во влажном климате и т.п., – результат действия водорода.

Вторая часть книги состоит из четырех глав и заключения.

В *первой* главе рассмотрена сущность эффекта безызносности, его механизм и закономерности. Описывается как было установлено это явление. Исследуются физико-химические процессы, которые характеризуют ИП. Показано, что избирательный перенос относится к самоорганизующимся системам, выявлен механизм обмена атомов сервовитной пленки с внешней средой путем образования и распада координационных соединений в смазочном материале и на поверхности трения. Отмечается, что высокая пластичность сервовитной пленки и отсутствие финального ее состояния обусловлены диффузионно-вакансионным механизмом.

Вторая глава посвящена применению избирательного переноса в различных отраслях техники: авиации, морском флоте, химическом машиностроении, легкой промышленности, сельскохозяйственном производстве, нефтяной и газовой промышленности, сложной бытовой технике, редукторостроении, станкостроении и др.

В *третьей* главе рассмотрены методы оценки антифрикционных и прочностных свойств тонких покрытий, а также определения смазывающей способности смазочных материалов. Описаны машины трения и приборы. Показано, что не все машины трения подходят к оценке свойств смазочных материалов, реализующих эффект избирательного переноса.

В *четвертой* главе излагается новый курс по преподаванию триботехники. В него входят: процесс ФАБО, металлоплакирующие смазочные материалы и безразборное восстановление машин и механизмов.

В *заключении* (прошлое и будущее избирательного переноса) представлены материалы об ИП как научном открытии, его признании учеными других стран. Дана перспектива использования этого явления при разработке узлов трения машин по прототипу сочленений живых организмов. Такое направление в создании интеллектуальных материалов и даже отдельных органов живых организмов планируется учеными Японии и Америки как приоритетное на следующее столетие.

Поскольку многие научные работники и инженеры внесли большой вклад в изучение механизма ИП и его применение в технике и в настоящее время некоторые из них стали ведущими специалистами по отдельным изложенным в книге вопросам, автор этой книги счел необходимым результаты работ этих специалистов представить в виде самостоятельных разделов.

Однако не все вошло во вторую часть книги. Вопросы изучения и применения финишной антифрикционной безабразивной обработки деталей, а также методы безразборного восстановления изношенных трущихся узлов в процессе эксплуатации машин, использование избирательного переноса с целью ускорения обкатки автомобильных и тракторных двигателей рассмотрены кратко. Подробно эти вопросы должны быть изложены в специальном курсе "Триботехника (технологические и эксплуатационные методы)", который автор предполагает издать в ближайшем будущем.

Глава 1 МЕХАНИЗМ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ПРИ ТРЕНИИ И ЕГО ЗАКОНОМЕРНОСТИ

1. Обнаружение избирательного переноса при трении (эффект безызносности)

В середине 50-х гг. при исследовании технического состояния шасси самолетов было обнаружено явление самопроизвольного образования тонкой пленки меди в парах трения бронза—сталь при смазывании их спиртоглицериновой смесью. Пленка меди толщиной 1...2 мкм в процессе трения покрывала как бронзу, так и сталь. Она резко снижала износ узла трения и уменьшала силу трения примерно в 10 раз. Почти в то же время подобное явление было обнаружено в парах трения сталь—бронза при смазывании смазкой ЦИАТИМ-201 (в шарнирно-болтовых соединениях самолетов). А несколько позднее также в паре сталь—сталь в узлах трения компрессора домашнего холодильника при смазывании маслофреоновой смесью.

Исследования показали, что медная пленка в паре сталь—бронза образуется в результате анодного растворения бронзы. При этом легирующие элементы цинк, олово, алюминий, железо уходят в смазочный материал и поверхность обогащается медью. После того как поверхность бронзы и стали покроется медью, растворение бронзы прекращается и устанавливается режим избирательного переноса (ИП).

В узлах трения компрессора домашнего холодильника медная пленка в паре сталь—сталь возникала в результате растворения медных трубок охладителя холодильника. Ионы меди, поступая в маслофреоновую смесь, двигались в зону контакта, где формировалась защитная медная пленка. Компрессоры холодильников могут работать десятки лет без ремонта.

Избирательный перенос при трении (эффект безызносности) — явление, по своему характеру противоположное изнашиванию: если при изнашивании во время трения все процессы в зоне контакта сводятся к разрушению поверхности, то процессы при избирательном переносе носят созидательный характер: они необратимы и относятся к самоорганизующимся процессам неживой природы.

Следует заметить, что на практике, в силу специфических условий работы ряда узлов трения, эффект безызносности проявляется не полностью. Поэтому не во всех случаях достигается полная безызносность. Под эффектом безызносности подразумевается принцип, на основе которого уменьшаются силы трения и интенсивность изнашивания деталей. Между тем, в реальных условиях, можно достичь такого результата, когда поверхности трения не только не изнашиваются, но и могут восстанавливаться. Создаются условия, как уже упоминалось, восстановления изношенных машин без их разборки. Это требует проведения специальных технологий.

Из первой части книги следует, что многообразие видов разрушения деталей при трении связано со многими физико-химическими и механи-

ческими процессами в зоне контакта, зависящими, главным образом, от окружающей среды, условий трения (скорости скольжения поверхностей, давления, температуры) и применяемых конструкционных и смазочных материалов.

Основные факторы, определяющие износ:

— пластические деформации, приводящие к наклепу поверхностей и разрушению их микронеровностей;

— окислительные процессы (при трении окислительные процессы происходят очень интенсивно). Окисные пленки, хотя и препятствуют схватыванию и глубинному вырыванию, хрупки, быстро разрушаются и образуются вновь;

— внедрение отдельных участков поверхности одной детали в сопряженную поверхность другой, что при скольжении вызывает образование неровностей поверхности и при многократном воздействии их разрушение;

— адгезионное схватывание контактирующих поверхностей, приводящее к переносу материала одной детали на другую и усилению изнашивания;

— накопление в поверхностях трения деталей водорода, что ускоряет изнашивание.

— абразивное воздействие на поверхности трения твердых частиц.

Все указанные процессы экспериментально подтверждены и глубоко изучены учеными во многих странах.

Контактирование деталей происходит не по всей поверхности трения, а только в отдельных точках (отношение фактической площади контакта к номинальной составляет 1:100—1:10000). Учитывая указанные выше факторы, вызывающие изнашивание узлов трения, можно утверждать, что идея создания безызносных узлов трения является нереальной. Поэтому длительное время главным направлением борьбы с изнашиванием и уменьшением сил трения было повышение твердости поверхностей трения деталей машин. При повышении твердости материала уменьшается взаимное внедрение одной поверхности в другую, снижаются пластические деформации и окислительные процессы, а также действие абразива. Было разработано много методов повышения твердости деталей: цементирование, хромирование, азотирование, поверхностная закалка, наплавка твердыми материалами и др. Это решило многие вопросы, связанные с повышением ресурса машин и оборудования. Так, электролитическое хромирование цилиндров двигателей внутреннего сгорания не только повысило износостойкость пары трения цилиндр—поршневое кольцо в 4...5 раз по сравнению с износостойкостью чугунных цилиндров, но и в большой степени снизило потери на трение в цилиндропоршневой группе двигателей.

Однако с увеличением нагрузок в узлах трения, ухудшением в некоторых случаях условий смазывания деталей, с повышением требований к КПД механизмов, применением специальных смазочных материалов и жидкостей, а в некоторых механизмах в связи с использованием в качестве смазочного материала воды, методы повышения износостойкости де-

талей путем увеличения их твердости перестали себя оправдывать. Напомним, что фактическая площадь контакта с увеличением твердости материала уменьшается. В результате неизбежных перекосов деталей при эксплуатации увеличивается возможность их заедания или роста интенсивности изнашивания.

Если в трении участвует только одна деталь, например лемех плуга или зуб ковша экскаватора, нож бумагорезательной машины, то невозможно представить, чтобы режущая кромка этих деталей вообще не изнашивалась. Но когда в трении участвует две детали и между ними находится смазка, то условия контакта деталей меняются. Здесь трущуюся пару можно рассматривать как термодинамическую систему, где возможен обмен поверхностей трения с внешней средой (смазкой) энергией и веществом и, следовательно, возможно образование новых структур на основе самоорганизующихся процессов.

2. Первоначальные сведения о самоорганизации в узлах трения

В поисках новых путей повышения износостойкости деталей машин целесообразно обратиться к живой природе. Анализ нагруженных подвижных сочленений живых существ показывает, что имеются два типа узлов трения — открытые и закрытые. Открытость и закрытость здесь понимается не в термодинамическом понятии, а в смысле попадания на трущиеся поверхности абразивных частиц, влаги, пыли и других веществ. В открытых узлах трения работает твердый материал по твердому – это зубы животных. Закрытые узлы трения — суставы живых организмов, “сконструированные” на принципах, которые в машиностроении не применяют. На твердой кости располагается мягкий хрящ, на поверхности которого имеется тонкая подвижная полимерная пленка. Сопряженная поверхность имеет такую же структуру. В суставе работают два одинаковых материала, причем мягкий по мягкому (рис. 1.1а).

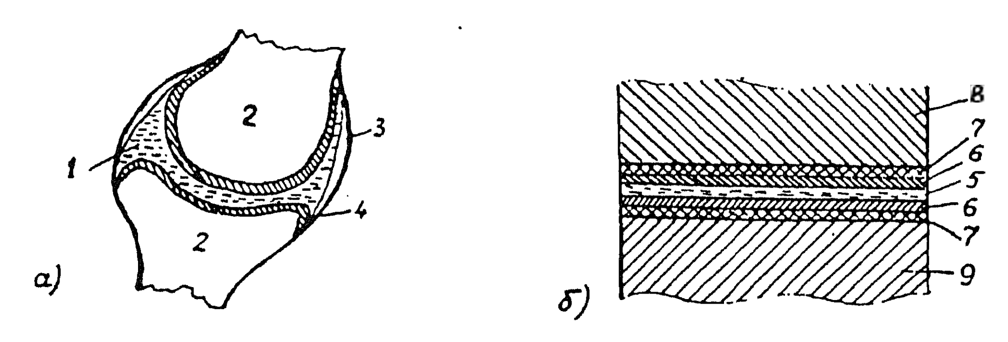


Рис. 1.1. **Схема коленного сустава человека, по Д. Муру (*а*), и пары трения бронза—сталь, работающей в режиме ИП (*б*):**

1 — синовиальная жидкость; *2* — кость; *3* — синовиальная оболочка; *4* — суставный хрящ; *5* — жидкость, обеспечивающая режим ИП; *6* — полимерная пленка; *7* — сервовитная пленка (медь); *8* — сталь; *9* — бронза

Суставы здорового человека имеют коэффициент трения 0,001...0,03, что много ниже коэффициента трения в гидродинамических радиальных подшипниках или в прецизионных подшипниках качения. Хотя поверхность хряща сустава и имеет шероховатость, в процессе нагружения сустава и его движения площадь фактического контакта в результате смятия шероховатостей близка к 100% [44].

Сравним работу сустава человека и пары трения бронза—сталь в режиме избирательного переноса (рис.1.1). Анализ приведенных схем показывает, что имеется достаточно четкая внешняя аналогия между работой сустава живого организма и пары трения бронза—сталь в режиме избирательного переноса. Эта аналогия лишь внешняя. В действительности механизм работы сустава живого организма в тысячи раз сложнее. Заметим, что подобные пары трения (у мыши, слона, рыбы, птицы) являются универсальными узлами, обладающими "безызносностью".

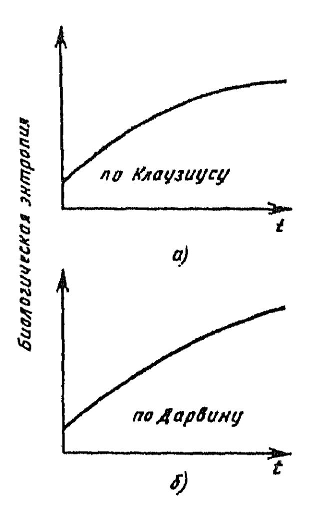


Рис. 1.2. **Рост беспорядка в соответствии со вторым законом термодинамики (*а*) и рост степени организованности в соответствии с законом Дарвина (*б*)**

Известно, что биологические системы обладают способностью к самовосстановлению и могут работать десятки лет без износа.

Долгое время существовало как бы противоречие законов развития живой и неживой природы. Основной закон термодинамики Клаузиуса предсказывает рост энтропии, т.е. беспорядка в замкнутой системе. Эволюционная теория Дарвина, наоборот, устанавливает, что в основе отбора лежит повышение степени организованности биологических систем. Эти взаимно противоположные законы развития можно представить графически (рис.1.2) [84]. Однако в последние десятилетия биологическая эволюция стала рассматриваться с кибернетических позиций и понятий автоматического регулирования и обратной связи, что в значительной степени сблизило эти два закона развития мира. Помимо сказанного основную роль в указанном сближении следует отвести спонтанному формированию структур в открытых системах на молекулярном уровне. Сейчас установлено [47, 79], что в открытых системах (рис.1.3), которые постоянно получают из внешней среды отрицательную энтропию и вещество, могут возникать стационарные неравновесные состояния с высокой степенью упорядоченности.

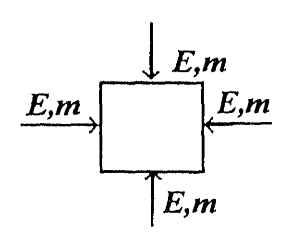


Рис. 1.3. **Потенциальная возможность спонтанного образования структуры в открытой системе**

В соответствии с термодинамикой неравновесных процессов новые структуры могут возникать в природе в тех случаях, когда выполняются следующие четыре необходимых условия [79, 84]:

1) система является термодинамически открытой, т.е. может обмениваться веществом *m* (или) энергией *E* со средой;

2) динамические уравнения системы нелинейные;

3) отклонения от равновесия превышают критическое значение;

4) микроскопические процессы происходят кооперативно (согласованно).

Второй закон термодинамики связан с первым условием: в системах, способных формированию структур, он не нарушается, а лишь проявляется в более общем виде. Второе и третье условия указывают, что нужно отойти от привычных линейных физических представлений и вступить в нелинейную область, где при определенных условиях упорядочение может наступить самопроизвольно. Четвертое условие отражает причинность образования процессов, идущих на микроскопическом уровне, при наличии особых связей, которые ведут к спонтанному возникновению структур [84].

Во многих явлениях неживой природы явно отсутствуют какие-либо признаки самоорганизации, наблюдается распад системы и увеличение энтропии. Так, кусок обычного сахара, выставленный на воздух, через некоторое время испаряется, исчезает. Обратного явления не происходит, сахар "из ничего" не образуется. След самолета в небе из конденсированных паров воды также вскоре рассеивается, пропадает [79]. Подобных примеров множество.

Но вот другие примеры. При определенных условиях из паров воды, находящихся в воздухе, образуются (выпадают) снежинки. Они имеют правильную форму и по структуре более высокую организацию, чем обычный пар. Здесь налицо явная самоорганизация. Из расплавов металлов или растворов солей образуются кристаллы. Это примеры самоорганизации неживой природы.

Самоорганизация не является универсальным свойством материи и существует лишь при определенных внутренних и внешних условиях. Вместе с тем это свойство не связано с каким-то особым классом веществ.

Узел трения в неживой природе может удовлетворять требованиям самоорганизации. Он представляет собой открытую систему. К нему подводится энергия от электродвигателя, вращающего механизм, или от двигателя внутреннего сгорания. Как правило, узлы трения смазываются. Смазочный материал состоит из множества одинаковых элементов, в данном случае — молекул. В нем могут быть мицеллы, ионы металлов. Все это создает условия для самоорганизации новых структур.

До последнего времени считалось, что трение является разрушительным процессом. Обратное утверждение считалось абсурдом, как и то, что можно создать узел, который бы не изнашивался. В следующем разделе будет показано, что трение может быть созидательным процессом и безызносность — это реальный процесс.

3. Безызносность узлов трения компрессора холодильника

Рассмотрим один из примеров самоорганизации — узлы трения компрессора домашнего холодильника. Компрессор холодильника, как уже отмечалось, работает десятки лет в тяжелых условиях (постоянные пуски и остановки) практически без износа. Детали, работающие на трение, выполнены из стали, смазочным материалом служит смесь 50% масла и 50% фреона. В процессе работы на поверхностях трения стальных деталей — шейках коленчатого вала (шатунной и коренных), сопряженных подшипниках, поршне и цилиндре — самопроизвольно образуется тонкая медная пленка толщиной 1...2 мкм. Пленка формируется из ионов меди, образующихся в смазочном материале в результате незначительного коррозионного процесса медных трубок охладителя. Медные трубки растворяются маслофреоновой смесью, и в ней появляются ионы меди. К месту контакта трущихся деталей ионы приносит охлаждающая смесь из фреона и масла, исполняющая также роль смазочного материала (рис.1.4).

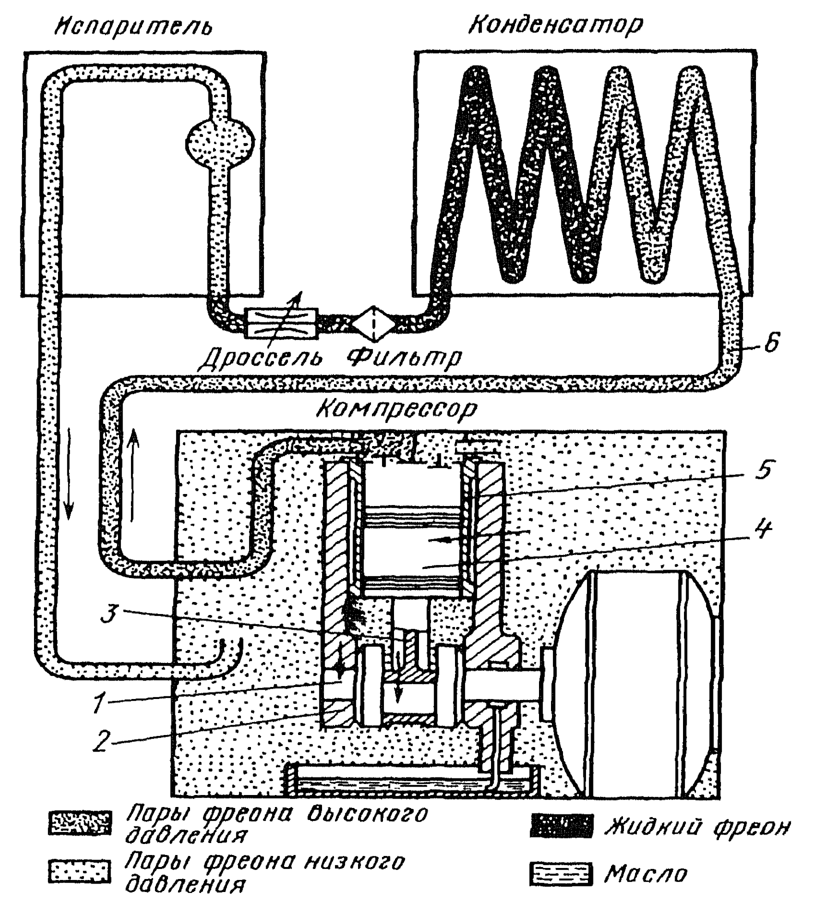


Рис. 1.4. **Схема смазывания компрессора домашнего холодильника:**
1 — коленчатый вал; *2* — подшипники коленчатого вала; *3* — шатун; *4* — поршень; *5* — цилиндр; *6* — змеевик из медных труб. Места отложения меди показаны стрелками

Активность масло-фреоновой смеси по отношению к медным трубкам охладителя повышается в результате образования в зоне трения при начальной работе компрессора слабых кислот (окисление масла). После того как в зоне контакта образуется пленка меди, условия трения деталей изменяются: снижается давление, уменьшается сила трения и падает температура. В результате процессы, образующие пленку меди (окисление масла и растворение трубок), могут прекратиться. Таким образом, как установил А.К. Прокопенко [61, 62], можно отметить следующую цепочку взаимообусловленных явлений, происходящих в смазочной системе компрессора и на поверхностях трения деталей.

Начальный период:

— в паре трения сталь—сталь смазочный материал окисляется, образующиеся кислоты растворяют поверхностные слои медных трубок охладителя и доставляют в смазочную систему ионы меди;

— ионы меди, циркулируя в смазочной системе, осаждаются на поверхности деталей только в зоне трения; узкие щели на деталях по отношению к массе детали представляют собой анодные участки; ионы меди втягиваются в зазоры сопряжений;

— в результате коллективного взаимодействия ионов происходит кристаллизация и образуется тонкая пленка меди, покрывающая поверхности трения деталей.

Установившийся режим:

— после того как поверхности трения покроются пленкой меди, пара трения сталь—сталь становится парой медь—медь; это приводит к снижению трения и, как результат, к снижению интенсивности окисления масло-фреоновой смеси и прекращению растворения медных трубок (структура медной пленки и ее антифрикционные свойства описаны ниже);

— в установившемся режиме трения медная пленка не изнашивается. Ее частицы могут переходить с одной поверхности трения на другую. Продукты износа пленки удерживаются в зазоре электрическими силами.

На основании рассмотренного примера можно утверждать, что трение может сопровождаться эволюционными процессами, в результате которых разрушение поверхностей становится второстепенным. Главным выступает созидательный характер трения, который обусловлен обменом узла трения с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов меди, из которых формируется тонкая медная пленка, защищающая поверхности трения от изнашивания.

Металлическую медную пленку, образующуюся в процессе трения, называют "**сервовитной** " (от лат. servo-witte — спасать жизнь). Она представляет собой вещество (в данном случае металл), образованное потоком энергии и существующее в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, оно ее создает. Образование защитной пленки относится к новому классу самоорганизующихся явлений неживой природы. Их изучение только началось.

При деформировании сервовитная пленка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению. Она воспринимает все нагрузки,

покрывая шероховатость поверхностей стальных деталей, которые практически не участвуют в процессе трения. Структура пленки отличается от структуры обычной меди; она квазижидкая — имеет много вакансий и мало дислокаций, образовалась в процессе трения (в стесненных условиях). Об этом изложено далее.

Теперь вспомним принцип работы узла трения, созданного природой, — сустав живого организма: работает мягкий материал по мягкому материалу. Нагрузка распределяется равномерно по поверхности трения, поэтому на единицу площади она незначительна. Это способствует продлению жизни узла трения. Такая же картина происходит и при работе узла трения в режиме ИП.

4. Механизм образования сервовитной пленки

В зависимости от вида смазочного материала, условий работы узла трения и конструкционных материалов, из которых изготовлены трущиеся детали, механизм формирования сервовитной пленки может быть различным.

1. Формирование сервовитной пленки в паре бронза – сталь при смазывании глицерином. Глицерин является модельной жидкостью, которая легче других реализует режим избирательного переноса (ИП) при трении пары бронза—сталь. В первый период работы пары происходит растворение поверхности трения бронзы. Глицерин действует как слабая кислота. Атомы легирующих элементов бронзы (олово, цинк, железо, алюминий и др.) уходят в смазочный материал, в результате поверхность бронзы обогащается атомами меди. После ухода атомов легирующих элементов с поверхности бронзы деформация ее при трении вызывает диффузионный поток новых атомов легирующих элементов к поверхности, которые затем уходят в смазочный материал. Таким образом, слой бронзы, который деформируется при трении, освобождается от легирующих элементов и становится в основном из меди. В нем образуется большое количество вакансий, часть из них нигелирует, образуя поры, которые заполняются молекулами глицерина.

Глицерин, как известно, является восстановителем окиси и закиси меди, поэтому поверхность трения медной пленки свободна от окисных пленок, она очень активна и способна к схватыванию со стальной поверхностью, так как имеет свободные связи. В результате стальная поверхность постепенно покрывается тонким слоем меди. Поскольку слой меди, образующийся на бронзовой поверхности, утончается вследствие его переноса на стальную поверхность, то происходит дальнейшее растворение бронзовой поверхности. Этот процесс происходит до тех пор, пока на обеих поверхностях, стальной и бронзовой, не образуется слой меди толщиной 1...2 мкм (рис. 1.5).

После того как медная пленка покроет бронзовую и стальную поверхности, молекулы глицерина уже не могут взаимодействовать с бронзой и "вытягивать" атомы легирующих элементов, процесс растворения брон-

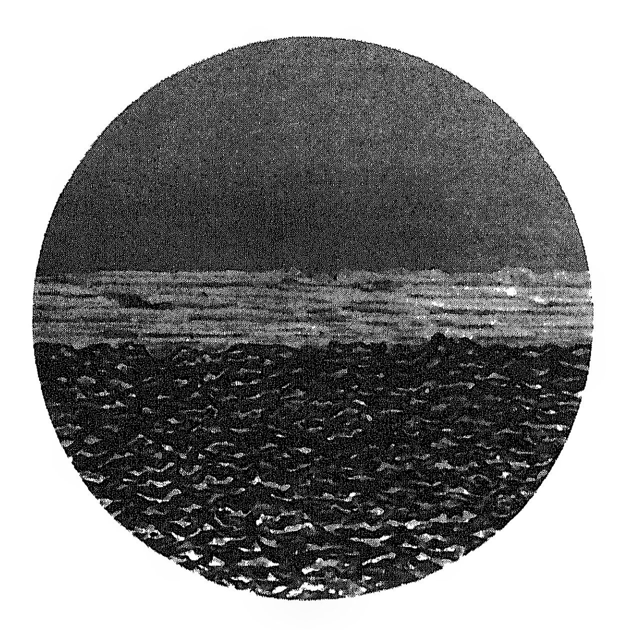


Рис. 1.5. **Пленка меди на стальной поверхности (косой срез)**

зы прекращается и наступает установившийся режим избирательного переноса.

Как установил С. Г. Красиков [29], процесс образования сервовитной пленки на стальной поверхности происходит дискретно. Частицы меди с бронзовой поверхности переносятся на вершины неровностей стальной поверхности, т.е. на те участки стали, которые непосредственно контактируют с бронзой. Затем постепенно происходит " сползание" накопившейся меди во впадины неровностей.

Глицерин при трении разрушает окисную пленку и на стальной поверхности, являясь восстановителем, как и для меди, обеспечивает высокую прочность сцепления медной пленки со стальной поверхностью. В результате последняя покрывается медной пленкой, и пара трения сталь—бронза становится парой медь—медь.

В процессе приработки в случае ограниченного объема смазочного материала в нем могут образоваться мицеллы — частицы меди, окруженные плотным кольцом молекул смазочного материала. Мицеллы имеют заряд, что удерживает их в зазоре. Иногда, по каким-либо причинам, мицеллы выходят из зазора; тогда под действием электрического поля они попадают в узкие щели, например, между испытуемым образцом и подложкой или под головку болта, крепящего образец, и там образуют тонкую пленку меди.

Образование пленки меди на бронзовой поверхности происходит в результате электрохимического процесса — процесса растворения металла.

Согласно закону электрохимической кинетики скорость анодного растворения должна возрастать при увеличении потенциала, однако при ИП этого не происходит. Вследствие образования сервовитной пленки между анодными и катодными участками поверхности бронзы процесс растворения может полностью прекратиться, наступит установившийся режим трения. Если по каким либо причинам медная пленка разрушится, то вновь произойдет растворение бронзы, и поверхность будет обогащаться медью, пока снова не наступит пассивное состояние.

В процессе образования сервовитной пленки в глицерине происходят изменения. Ю.С. Симаков и А.А. Поляков [57, 71] установили следующие химические превращения глицерина:

а) механохимические превращения с уменьшением молекулярной массы:

```
                                   O
                                  //
                              H — C
                                   \
                                    H
                                                        H  H
   H                                                    |  |  //O
   |                                                    C = C - C
 H-C-OH                                                 |        \
   |                                                    H         H
 H-C-OH   }  →  (четыре стрелки к продуктам)
   |                                                    H    H    H
 H-C-OH                                                 |    |    |
   |                                                H — C —  C —  C
   H                                                    |    |    ||
                                 H    H    //O          OH   OH   O
                                 |    |   //
                             H — C —  C — C
                                 |    |   |
                                 OH   OH  OH
```

б) взаимодействие продуктов превращения; происходит восстановление продуктов коррозии и растворение активных металлов и их соединений:

```
    //O                //O       H  H  //O                   H    H   //O
H - C   + CuO → H - C    + Cu;   |  |  //                    |    |   //
    \               \            C = C - C   + CuO →  H — C  — C  — C    + Cu;
     H               OH          |        \               |    |    |
                                 H         H              OH   OH   OH

          H    H   //O           H    H   //O       O        H    H
          |    |   //            |    |   //         \\      |    |
Fe + 2H - C  — C — C   →    H —  C  — C — C            C — C  — C — H  + 2H;
          |    |    \            |    |    \          /    |    |
          OH   OH    OH          OH   OH    O - Fe - O     OH   OH

           //O                //O         O
          //                 //            \\
Fe2O3 + 6H - C    →    2H - C               C - H  + 3HO,
              \              \             /
               OH             O  -  Fe  - O
                                     |
                                     O
                                     | //O
                                     C
                                     |
Fe + CuO → FeO + Cu;                 H
```

в) может происходить образование высокомолекулярных соединений, а также полимеров трения:

$$\begin{array}{ccccccc} & H & & H & & H & \\ & | & & | & & | & \\ H- & C & - & C & - & C & -H \\ & | & & | & & | & \\ & OH & & OH & & OH & \end{array} + \begin{array}{ccccccc} & H & & H & & H & \\ & | & & | & & | & \\ H- & C & - & C & - & C & -H \\ & | & & | & & | & \\ & OH & & OH & & OH & \end{array} \rightarrow \begin{array}{ccccccccccccc} & H & & H & & H & & H & & H & & H & \\ & | & & | & & | & & | & & | & & | & \\ H- & C & - & C & - & C & -O- & C & - & C & - & C & -H \\ & | & & | & & | & & | & & | & & | & \\ & OH & & OH & & H & & H & & OH & & OH & \end{array} + H_2O$$

$$n \begin{array}{ccc} H & & H \\ | & & | \\ C & = & C \\ | & & | \\ H & & C{=}O \\ & & | \\ & & H \end{array} \rightarrow \left[\begin{array}{cccccc} & H & & H & & \\ & | & & | & & \\ - & C & - & C & - & C \\ & | & & | & & \\ & H & & C{=}O & & \\ & & & | & & \\ & & & H & & \end{array} \right] n$$

Образующиеся полимеры трения создают дополнительный слой (помимо меди), разделяющий основной металл пары трения от непосредственного контактирования:

$$2 \begin{array}{ccccccccccccc} & H & & H & & H & & H & & H & & H & \\ & | & & | & & | & & | & & | & & | & \\ H- & C & - & C & - & C & -O- & C & - & C & - & C & -H \\ & | & & | & & | & & | & & | & & | & \\ & OH & & OH & & H & & H & & OH & & OH & \end{array} + Zn \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{array}{ccccccccccccccccccccccccc} & H & & H & & H & & H & & H & & H & & H & & H & & H & & H & & H & & H & \\ & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & \\ H- & C & - & C & - & C & -O- & C & - & C & - & C & -O-Zn-O- & C & - & C & - & C & -O- & C & - & C & - & C & -H \\ & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & & | & \\ & OH & & OH & & H & & H & & OH & & H & & H & & OH & & H & & H & & OH & & OH & \end{array} + 2H$$

г) образование поверхностно-активных веществ (обладая высокой активностью, они адсорбируются на поверхности деталей трения и могут вступать в химическое взаимодействие с поверхностями деталей, образуя хемосорбционные слои; участвуют также в мицеллообразовании) (рис. 1.6).

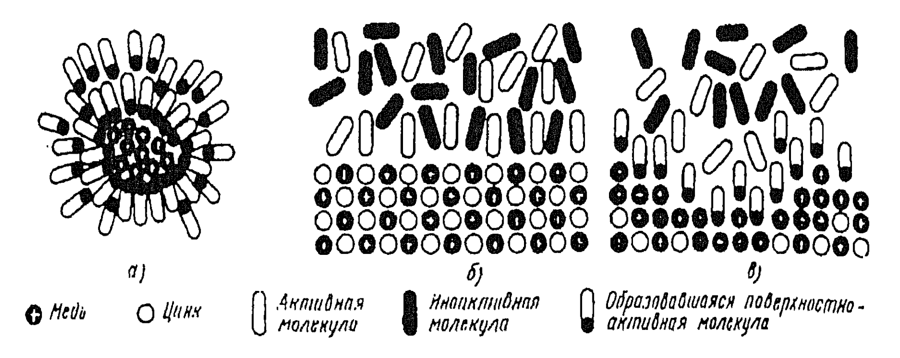


Рис. 1.6. **Мицеллообразование и взаимодействие поверхностно-активных веществ с бронзовой поверхностью:**
а — мицелла; *б* — начальный период растворения; *в* — поверхность бронзы после растворения обогащена медью

Помимо отмеченного происходят и каталитические превращения. Поверхность меди при отсутствии окисной пленки может вызвать дегидрогенизацию спирта. В результате выделяется свободный водород, который активно участвует в процессе трения, — восстанавливает окисные пленки на медном сплаве и стали, поддерживая процесс безокислительного трения. При температуре более 65°С увеличивается выделение водорода, и режим ИП переходит в водородное изнашивание. Поверхность стального образца интенсивно насыщается водородом, растрескивается и в виде порошка переносится на поверхность бронзы. Необходимо сделать следующее замечание. Температура 65°С — критическая температура реализации ИП в паре бронза—сталь только при смазке глицерином. При других смазках критическая температура будет равна температурной стойкости этой смазки.

Выше рассмотрен механизм образования сервовитной пленки в паре бронза—сталь в среде глицерина. Глицерин имеет простую химическую формулу и легко реализует режим ИП. В реальных конструкциях глицерин как смазочный материал не применяют. Ранее в самолетных гидросистемах в качестве гидрожидкостей применяли спиртоглицериновую смесь, где осуществлялись все вышеописанные процессы. В последствии спиртоглицериновую смесь заменили на более сложную в химическом отношении гидрожидкость АМГ-10. В этой жидкости режим ИП в паре бронза—сталь осуществляется при более высоком давлении. Жидкость АМГ менее активна в химическом отношении, чем спиртоглицериновая смесь.

При высоких давлениях режим ИП в паре бронза—сталь может наблюдаться при смазывании узлов трения ЦИАТИМ-201 и обычными минеральными маслами, особенно в узлах трения с возвратно-вращательным движением. Как установлено О.Н. Курловым [38], кинематика узла трения существенно влияет на процесс образования сервовитной пленки. В обратной паре трения режим ИП проявляется в большей степени, чем в прямой.

2. Сервовитная пленка может образовываться в узле трения сталь—сталь при работе с металлоплакирующими смазочными материалами, содержащими мелкие частицы бронзы, меди, свинца, серебра и др. При использовании ЦИАТИМ-201 с добавками порошка меди, бронзы или латуни, а также свинца в паре сталь—сталь поверхности деталей покрываются тонкой пленкой, состоящей из металла применяемых порошков. В процессе работы порошки частично растворяются в смазочном материале и в результате восстановления окисных пленок на их поверхности прочно схватываются со сталью, образуя сервовитную пленку. Такие пленки пластичных металлов пористы и содержат в порах смазочный материал. Коэффициент трения при высоких нагрузках снижается, а стальные поверхности не изнашиваются. При трении сдвиг поверхностей трения происходит внутри образующихся пленок по диффузионно-вакансионному механизму [1,52]. При хорошо восстанавливающих свойствах смазочного материала можно для реализации ИП вводить закись или окись меди. Сервовитная пленка образуется в результате восстановления окислов меди в процессе трения.

3. В промышленности М.В. Голубом [14], а также Е.Н. Грискиным [16] разработан ряд порошковых твердоспеченных материалов, работающих в режиме ИП. Шихта для твердоспеченного материала готовится из тонкодисперсных смесей порошков ВК3, ВК6, ВК8 или из указанных смесей с добавлением литого карбида вольфрама (WC+W2C) релита зернистостью 0,1...0,25 мм в отношении 1:3.

В качестве связующего материала применяют сплавы, содержащие медь (главным образом медно-никелевые), которые обладают жидкотекучестью и обеспечивают высокую прочность порошкового материала. Порошковые материалы могут работать в режиме ИП при смазывании нефтью, нефтепродуктами и сточными водами. Сервовитная пленка образуется на поверхности твердых составляющих сплава в результате механического выдавливания мягкой составляющей и ее последующего растворения. Сплавы способны работать в одноименной паре (композиционный материал по композиционному материалу). Такое сочетание материалов работоспособно только благодаря образованию сервовитной пленки, которая обеспечивает смазывание твердых составляющих порошковой композиции. Эти составляющие без пленки меди не могут нести нагрузку, происходят задиры поверхностей.

4. Сервовитная пленка может образоваться при трении о сталь ПТФЭ, наполненного закисью меди при смазывании глицерином. Пленка образуется в результате восстановления закиси меди до чистой меди. При трении стальная поверхность покрывается сервовитной пленкой.

Были исследованы антифрикционные композиции на основе эпоксифурановых олигомеров и медьсодержащих наполнителей в среде глицерина и углеводородных масел (МС-20), а также принципиально новые композиции, у которых образование легкоподвижных медных пленок в зоне трения возможно вследствие термического распада наполнителей, например, фермиата или силицилата меди [73]. Повышение нагрузочной способности пары трения в присутствии органических солей меди объясняется тем, что медь, выделяющаяся в коллоидном состоянии в результате разложения указанных солей, под действием сил трения и высоких локальных температур находится в неокисленном виде; она способна взаимодействовать с металлической поверхностью контртела и образовывать на ней тончайшую политурообразную пластичную медную пленку.

5. Неожиданным было обнаружение сервовитной пленки меди на упорных подшипниках скольжения, применяемых в турбинах и турбокомпрессорах. Подшипник состоит из упорного стального гребня, неподвижно закрепленного на вращающемся валу, и корпуса, внутри которого размещены по окружности плавающие подушки (сегменты). До последнего времени сегменты изготовляли из бронзы БрОФ 8,0—0,30, на которые наплавляли баббитовый слой толщиной несколько миллиметров. Такая конструкция известна под названием подшипников Митчеля и применяется издавна в упорных подшипниках скольжения.

Б.П. Кузовкин совместно с сотрудниками Института проблем материаловедения АН Украины предложили наносить на поверхность бронзового сегмента бронзофторопласт из частиц сферической формы и про-

питки слоя суспензией фторопласта 4Д с последующей калибровкой фторопластового слоя. При работе подшипника на слое фторопласта и сопряженной стальной поверхности образовывалась сервовитная пленка.

В результате длительных промышленных испытаний была установлена значительно большая износостойкость и надежность работы новых подшипников.

6. В последние годы В.О. Гречко под руководством А.С. Кужарова выявлен оригинальный механизм образования сервовитной пленки в паре трения сталь—волокна ПТФЭ, наполненного тонкой медной проволокой [15]. В зарубежной практике широко применяют подшипники скольжения из ПТФЭ, наполненного бронзой. При работе таких подшипников в паре со стальным валом в ряде случаев образуется сервовитная пленка меди. Однако механизм работы таких подшипников выяснен еще недостаточно. Высокие антифрикционные свойства подшипников объясняли большой смазочной способностью ПТФЭ, обусловленной низким межмолекулярным взаимодействием в полимере и, как следствие, облегченным проскальзыванием образующихся при трении тонких (менее 1 нм) пластинообразных кристаллических полос. Роль порошка бронзы сводилась к фактору, повышающему теплопроводность покрытия. Подчеркивали также особые свойства ПТФЭ, в частности его высокую инертность.

Для понимания механизма трения ПТФЭ следует учитывать возможность химического взаимодействия продуктов его трибохимических превращений с металлами и их роль в процессе трения. Оказалось, что при тяжелых режимах трения и высоких температурах ПТФЭ, несмотря на свою " классическую" инертность, бурно реагируют с некоторыми металлами.

Применяя ряд физических методов анализа, А.С. Кужаров и В.О. Гречко пришли к выводу, что при трении ПТФЭ, наполненного медной проволокой, в паре со стальным валом без смазочного материала реализуется ИП. Поверхность стали и ПТФЭ обогащается медью, на которой формируется, кроме того, металлополимерный слой в виде координационного соединения. Структура фрикционного контакта, обеспечивающего режим ИП при трении медно-фторопластового композита, представлена на рис. 1.7.

Приведенная структура граничного слоя состоит из связанного с поверхностью кристаллической решетки стали, слоя сервовитной пленки меди и металлополимерного слоя (1...16 нм), ориентированного в направлении трения. Закрепление металлополимерного слоя на поверхности сервовитной пленки осуществляется в результате комплексообразования [31].

Рис. 1.7. **Структура граничного слоя, образующего при трении медно-фторопластового композита по стали:** *1* — слой комплексов; *2* — сервовитная пленка меди; *3* — сталь

Таким образом, высокие триботехнические свойства медно-фторопласто-

вых композитов связаны с реализацией ИП при трении без смазочного материала вследствие образования координационных соединений с двухвалентной медью. Наличие смазочного материала в таких композициях улучшает триботехнические характеристики во всем диапазоне нагружения, особенно при легировании смазочных материалов комплексообразующими присадками.

5. Постулаты классической (коммунальной) триботехники и натуртриботехники

5.1. Классическая (коммунальная) триботехника

Еще в 1939 г. в СССР на 1-й Всесоюзной конференции по трению и износу было высказано положение о том, что при рассмотрении пары трения, например вал—подшипник, нужно изучать триаду: материал вала, материал подшипника и смазочный материал [74]. Развивавшаяся в дальнейшем проф. И.В. Крагельским молекулярно-механическая теория трения и изнашивания [28] рассматривала процесс изнашивания исходя из трех стадий: 1 — взаимодействия *поверхностей, 2 — изменения на поверхностях и 3 — разрушение.* Эта теория исходила также из того, что при трении происходит непосредственный контакт материалов деталей. Согласно И. В. Крагельскому, взаимодействие материалов при трении может быть двух видов: механическое и молекулярное. Конечно, это нужно рассматривать условно, поскольку оба вида взаимодействия могут иметь место одновременно. Один материал влияет на изменение физико-химических свойств другого сопряженного с ним материала.

Одной из главных задач триботехники стало установление изменений свойств сопряженных поверхностей в процессе трения; именно от этого изменения будут зависеть величины износа и силы трения в сопряжении.

Появилось такое понятие, как приработка деталей [80]. Это связано с тем, что при первоначальном контактировании трущиеся поверхности не могут нести эксплуатационные нагрузки, площадь их фактического контакта очень мала и имеется возможность схватывания, образования задиров и преждевременного выхода узла трения из строя. В процессе приработки происходят на поверхностях трения физико-химические изменения, которые в дальнейшем и определяют надежность и долговечность работы пары трения.

Появился также термин "приспособляемость". Авторы этого понятия утверждают, что каждый материал, работающий в узле трения, имеет свойство приспосабливаться к условиям работы: под действием сопряженного материала он упрочняется и становится более износостойким [27]. Заметим, что понятия приработка и приспособляемость близки.

Последнее время в триботехнике появилось еще одно понятие, которое также относится к взаимодействию материалов пары трения. Это понятие "совместимость" одного материала по отношению к другому материалу [8]. Можно отметить, что, например, незакаленная сталь не может работать по незакаленной стали, — такие материалы несовместимы [9].

Незакаленный вал не может работать по бронзовому подшипнику, так же как хромированное поршневое кольцо по хромированному цилиндру [49].

К терминам и понятиям *приработка, приспосабливаемость и совместимость* добавим такие, как *шероховатость, заедание, изнашивание, задир, взаимное внедрение, взаимодействие поверхностей.* Эти термины заимствованы из имеющих хождение при общении людей, проживающих в общежитиях, коммунальных квартирах и бараках.

Здесь сделаем небольшое отступление от темы этого раздела и отметим, что люди бóльшую часть своего времени пребывают в трех вариантах общения в зависимости от условий проживания: 1) живущие в отдельных квартирах; 2) живущие в общежитиях и коммунальных квартирах; 3) находящиеся в тюрьмах и лагерях. Во всех указанных вариантах люди общаются различно. В отдельной квартире семья (которую считаем органически целым) может существовать без *непосредственного и насильственного контакта* с жильцами других квартир. Во втором и третьем вариантах общения жильцы взаимодействуют между собой вне зависимости от того, хотят они этого или нет. *При этих вариантах используются все термины и понятия, которые и заимствовали специалисты по триботехнике.*

Каждая коммунальная квартира или общежитие представляют собой сложную систему взаимоотношений людей, зависящую от множества факторов, характерных только для этой квартиры. Жизнь такой квартиры напоминает в какой-то мере работу пары трения со всеми ее особенностями.

Таким образом, современную (классическую) триботехнику, в которой основным положением является непосредственное взаимодействие материала одной детали с материалом другой, можно условно именовать “ **коммунальной триботехникой**”.

Здесь все сказанное в настоящее время относится к элементарным понятиям триботехники и известно всем специалистам по вопросам трения, износа и смазки в машинах. Однако мы эти вопросы изложили для того, чтобы прийти к следующему выводу: поскольку в инженерной практике имеется большое количество разнообразных материалов, применяемых в узлах трения, их сочетания могут быть весьма обширны. Если еще учесть то обстоятельство, что в процессе работы свойства материалов изменяются (в зависимости от условий трения и применяемых смазочных материалов, которых также имеются тысячи), то число физико-химических изменений на трущихся поверхностях и их интенсивность, от которых зависят величины износа и силы трения, может быть бесконечным и предусмотреть их все практически невозможно. Достаточно, например, в алюминиевожелезистоникелевой бронзе при 4% железа и 4% никеля увеличить содержание алюминия с 10 до 11%, как произойдет образование хрупких структур в сплаве, что резко снизит износостойкость пары бронза—сталь [68]. Можно привести многочисленные примеры, когда незначительное отклонение от технологического процесса изготовления деталей узлов трения приводило к образованию задиров на поверхностях трения и выходу деталей из строя.

Антифрикционность узла трения, как уже было сказано, зависит от двух сопряженных деталей и смазки. Выполнены и ежегодно выполняются тысячи научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в числе которых:

— разработка новых износостойких и антифрикционных материалов и покрытий, а также смазочных материалов для узлов трения;

— изучение влияния шероховатости и волнистости поверхности на первоначальный износ деталей узлов трения, надежность и энергетические затраты;

— определение оптимального состава конструкционных и антифрикционных материалов применительно к конкретным узлам трения машин и оборудования, которые обеспечивали бы минимальные потери на трение, высокую износостойкость и надежность работы;

— оценка совместимости различных материалов в парах трения с точки зрения схватывания поверхностей, переноса материала с одной поверхности трения на другую, их износостойкости и потерь на трение;

— исследование прирабатываемости материалов, продолжительности этого процесса, оценка оптимальных режимов приработки, возможности использования приработочных покрытия, разработка различных технологических приемов и специальных приработочных присадок к маслам и приработочных масел;

— изучение изменений в поверхностных слоях трущихся деталей в результате действия пластической деформации, температуры и окружающей среды и влияние этих изменений на антифрикционные свойства пар трения;

— изучение различных видов изнашивания и их закономерностей (окислительного изнашивания, водородного, коррозионно-механического, фреттинг-коррозии и др.);

— изучение механизма разрушения поверхностей трения материалов при трении скольжения и контактной усталости материалов в подшипниках качения, зубчатых передачах и кулачковых механизмах, определение влияния различных факторов (твердости поверхности, вида финишной обработки, типа смазочного материала и др.) на контактную выносливость узла трения; разработка расчета трущихся деталей на трение и износ.

Естественно этим не исчерпываются все направления по изучению процессов трения, изнашивания и смазки в машинах. Их большое разнообразие связано с тем, что в процессе работы узла трения трущиеся материалы имеют непосредственный контакт. С каждым годом разрабатываются все новые износостойкие и антифрикционные материалы и, для того чтобы оценить их служебные свойства, требуется проведение большого количества экспериментальных исследований. Изменения первоначальных свойств материалов в эксплуатации машин практически непредсказуемы, и это не дает возможности заранее что-либо предвидеть. Налицо огромная разрозненность направлений исследовательских работ в области триботехники и, как результат, малая их эффективность. Возникает вопрос: как выйти из этого положения?

5.2. *Понятие о натуртриботехнике (самоорганизации в узлах трения)*

Как было показано ранее, обеспечение безызносной и длительной работы узла трения в настоящее время сводится к созданию между трущимися деталями металлической пленки, отделяющей одну поверхность от другой. В этом и состоит главная задача триботехники. При решении такой задачи многие исследования, которые проводились в течение ряда лет во многих странах, становятся ненужными. К ним могут быть отнесены исследования по прирабатываемости; влиянию на трение и износ шероховатости поверхностей; взаимодействию различных пар трения (имеется в виду механическое и молекулярное взаимодействие); изменениям на поверхностях трения от пластической деформации, температуры и окружающей среды; процессам разрушения поверхностей трения и др.

Исходя из изложенного направление исследований по разработке безызносных узлов трения, моделирующих узлы, созданные природой, можно назвать **натуртриботехникой** [11]. Эти исследования в данное время находятся на первой стадии развития. В натуртриботехнике на первый план выступают следующие исследования:

1. Создание условий в узле трения, при которых образуется сервовитная пленка [18, 25]:

— разработка металлоплакирующих смазочных материалов и присадок к ним;

— разработка материалов, содержащих металлоплакирующий состав, обеспечивающий в процессе трения формирование сервовитной пленки;

— разработки конструкционных мероприятий (бронзовые вставки или специальные металлоплакирующие элементы в конструкцию узла трения), обеспечивающие образование сервовитной пленки.

2. Изучение смазочного действия сервовитной пленки в узле трения [31, 68]:

— образование комплексных соединений (металла с активными элементами смазочного материала), их разложение и образование вновь [21, 31];

— подбор наиболее рациональных комплексных соединений для различных классов узлов трения;

— изучение образования комплексов, образующихся при взаимодействии металла (плакирующего элемента) с активными частями пластмасс.

3. Исследование структуры сервовитной пленки в зоне контакта деталей при ее деформации, длительности работы сочленения в зависимости от вида смазочного материала, условий работы и среды [68].

— рентгеновские исследования по строению сервовитной пленки и ее взаимодействию с активными элементами смазочного материала;

— изучение диффузионных процессов при деформировании сервовитной пленки и их роли в обеспечении ее долговечности;

— изучение структурных критериев явления избирательного переноса.

4. Изучение самоорганизующихся процессов в зоне фрикционного контакта [53]:

ГРАНИЧНОЕ ТРЕНИЕ

ГЛАВНЫЙ ПОСТУЛАТ

Основные материалы I и II непосредственно контактируют и образуют "Насильственный контакт"

ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

1. Взаимодействие
2. Приработка
3. Приспосабливаемость
4. Совместимость
5. Шероховатость
6. Схватывание
7. Износ
8. Взаимное внедрение
9. Агрессивность одного материала по отношению к другому
10. Фактическая площадь контакта
11. Диспергирование

Рис. 1.8. Схема контакта деталей при граничной смазке

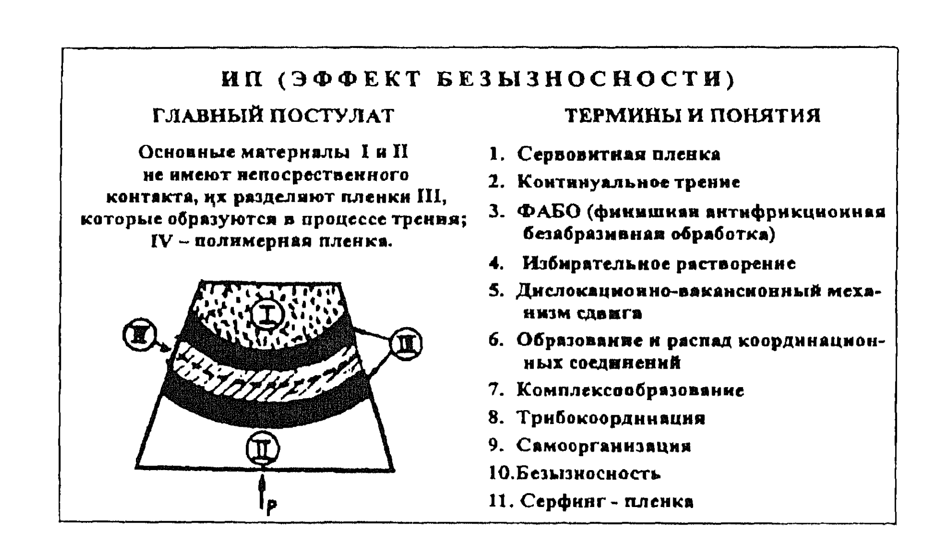


Рис. 1.9. Схема контакта деталей при избирательном переносе

— изучение диссипативной структуры поверхностного слоя при ИП;

— изучение возбужденного состояния поверхности в результате выхода дислокаций и взаимодействия их со смазочным материалом;

— исследование пластических деформаций поверхностного слоя при режиме ИП и их роли в растворении поверхности и диффузионных процессах.

5. Разработка новых технологических и эксплуатационных методов повышения машин и оборудования на основе ИП:

— разработка технологий и оснастки по использованию финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО-1) стальных и чугунных трущихся деталей машин;

— разработка новых технологических процессов восстановления изношенных машин и оборудования без их разборки (ФАБО-2);

— оценка влияния методов ФАБО-1 и ФАБО-2 на повышение ресурса машин и оборудования, снижение расхода топлива и электроэнергии, уменьшения расхода смазочных материалов, объема смазочно-регулировочных работ в эксплуатации, сокращения времени приработки и снижения СО при работе двигателей внутреннего сгорания;

— расширение применения в качестве смазочного материала пресную и морскую воду [64].

Натуртриботехнику можно отнести к самостоятельному направлению в области конструирования, изготовления и эксплуатации машин и оборудования.

Отметим, что главным постулатом классической (коммунальной) триботехники является то, что трущиеся материалы при работе все время между собой контактируют и находятся в состоянии насильственного контакта. В натуртриботехнике главный постулат другой. Здесь трущиеся материалы не имеют непосредственного контакта между собой, их разделяют металлическая сервовитная пленка и серфинг-пленка, которые образуются в процессе трения.

В заключение этого раздела приведем принципиальные схемы по контактному взаимодействию двух трущихся тел в режиме классической (коммунальной) триботехники и натуртриботехники (рис.1.8 и 1.9). На этих же рисунках сформулированы постулаты и даны основные термины, используемые в двух триботехниках.

6. Научные дисциплины, явления, термины и понятия, необходимые при изучении ИП

Эффект безызносности (избирательный перенос при трении) характеризуется сложными физико-химическими процессами, протекающими в зоне контакта трущихся деталей, и базируется в первую очередь на самоорганизации неравновесных процессов (формирование сервовитной металлической пленки), химии координационных соединений (взаимодействие смазочного материала с образовавшейся металлической пленкой) и физике тонких пленок (особая структура металлической пленки, разрядка дислокаций, растворение металла, диффузионные процессы).

Рассматриваемый комплекс вопросов характеризуется физическим единством явления безызносности, что позволяет глубоко осмыслить и представить перспективу развития нового научного раздела в триботехнике.

При изучении ИП в технической литературе появились новые термины и понятия. Некоторые из них уже широко используются в техничес-

кой литературе, например, такие как сервовитная пленка, избирательный перенос, металлоплакирующая смазка, финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и др. Другие термины менее известны – серфинг-пленка, трибо-ПАВ, континуальное трение и др.

Автор счел необходимым напомнить читателю о некоторых научных дисциплинах и понятиях, известных в науке как энтропия и синергетика, а также сформулировать явления и термины, необходимые при изучении избирательного переноса.

6.1. Энтропия

Энтропия (от греч. "entropia" — поворот, превращение) — мера неупорядоченности больших систем. Впервые понятие "энтропия" введено в XIX в. в результате анализа работы тепловых машин, где энтропия характеризует ту часть энергии, которая рассеивается в пространстве, не совершая полезной работы (отсюда определение: энтропия — мера обесценивания энергии). Затем было установлено, что энтропия характеризует вероятность определенного состояния любой физической системы среди множества возможных ее состояний. В закрытых физических системах все самопроизвольные процессы направлены к достижению более вероятных состояний, т.е. к максимуму энтропии. В равновесном состоянии, когда максимум достигается, никакие направленные процессы невозможны. Отсюда возникла гипотеза о тепловой смерти Вселенной.

Однако распространение на всю Вселенную законов, установленных для закрытых систем, не имеет убедительных научных оснований. В XX в. понятие энтропии оказалось плодотворным для исследования биосистем, а также процессов передачи и обработки информации. Эволюция в целом и развитие каждого организма происходят благодаря тому, что биосистемы, будучи открытыми, питаются энергией от окружающего мира. Но при этом биопроцессы протекают таким образом, что связанное с ними " производство энтропии" минимально. Это служит важным руководящим принципом и при разработке современных технологических процессов [46].

6.2. Синергетика

Синергетика (от греч. syhergtikos — совместный) — возникшее в середине 70-х гг. прошлого столетия новое междисциплинарное направление научных исследований. Синергетика ставит задачей выявление и познание общих закономерностей, управляющих процессами самоорганизации в системах разной природы: физических, химических, биологических, технических, экологических и др.

Синергетика исследует весь комплекс явлений, специфических для переходов сложных систем от неупорядоченного состояния к упорядоченному и обратно. В настоящее время разработка этих проблем в рамках синергетики обусловлена различными подходами к проблеме самоорганизации в целом и особенностям рассмотрения конкретных вопросов.

Так, в работах И. Пригожина (Бельгия) и его сотрудников проблемы самоорганизации разрабатываются с позиции диссипативных структур, в основе которой лежат идеи, методы и принципы нелинейной термодинамики неравновесных процессов [46].

Синергетика в настоящее время выступает в качестве одного из важнейших источников нового образа научного мышления, необходимого для решения сложного комплекса разнообразных междисциплинарных задач, возникающих с связи с познанием и практическим овладеванием процессами самоорганизации, задачами, которые в настоящее время встают не только в естествознании, но и в технике экологии [46].

6.3. Избирательный перенос при трении (эффект безызносности)

Избирательный перенос — вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта тонкой неокисляющейся металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу и не способной накапливать при деформации дислокации. На пленке, образуя с ней химическую связь, может происходить образование координационных соединений из продуктов механической деструкции углеводородов смазки, создавая дополнительный антифрикционный слой. Эта пленка повышает износостойкость поверхности (до 2 порядков) и снижает силы трения (на порядок) по сравнению с аналогичными условиями трения при граничной смазке. Для нее характерен нелинейный режим взаимодействия вакансий и дислокаций — вакансионно-дислокационный механизм сдвига, задаваемый повышенной концентрацией вакансий при избирательном растворении упрочненных участков поверхности в процессе трения.

При некоторой критической концентрации вакансий в пленке происходит переход от консервативного движения дислокаций к их неконсервативному переползанию к поверхности и выходу на нее. Дислокации переходят на другой уровень взаимодействия с кристаллической решеткой металла с существенно меньшей затратой энергии, что сопровождается релаксацией напряжений.

Поскольку при эффекте безызносности трение сопровождается эволюционными процессами – образование металлической пленки на трущихся поверхностях, то главным в этом случае становится самоорганизующийся характер трения, который обусловлен обменом трущейся пары с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов металла, из которых формируется металлическая пленка. Она представляет собой металл в особом состоянии, имеющем место только в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, так как оно ее воспроизводит.

Пленка при трении образуется из одного из материалов, участвующих в трении (бронзы, латуни), или другого медного сплава, или же из смазочного материала, содержащего порошки пластичных металлов, их соли, комплексные соединения металлов, металлорганические соединения.

6.4. Вакансионно-дислокационный механизм при ИП

При исследовании прочности и пластичности поверхностных слоев металлов В.П. Алехиным [1] был установлен диффузионно-вакансионный механизм. Сущность этого механизма в области низких (комнатных) температур и напряжений заключается в том, что в поле приложения напряжений и действия некоторых других условий (отсутствия окисных пленок и др.) изменяется химический потенциал точечных дефектов (вакансий и междоузлий), и в материале спонтанно возникают противоположно направленные диффузионные потоки вакансий и атомов. Однако при этом возникает дислокационный барьер, мешающий действию механизма. Избирательное растворение в режиме избирательного переноса снимает барьер, действуя совместно с полем приложенных напряжений. Дислокации, выходя на поверхность, делают систему избирательного переноса открытой благодаря химической реакции "свободных" атомов с лигандами смазки. Свободные атомы возникают в местах выхода дислокаций. Периодическое упрочнение и разупрочнение пленки создает циклическую накачку вакансий, а циклическое растворение свободных атомов приводит к образованию смазочного слоя из координационных соединений. В режиме избирательного переноса механизм обозначается вакансионно-дислокационный [1, 52].

6.5. Конфигурационная энтропия металла

При трении происходит диссипация энергии не только в виде теплоты, электричества и др., но и запасается в поверхностном слое в виде скоплений легирующих элементов и дислокаций, что можно характеризовать как увеличение конфигурационной энтропии. Избирательное растворение поверхности медного сплава при ИП облегчает выход дислокаций на поверхность и уменьшает образование конфигурационной энтропии. Чтобы оценить структуру пленки в этом отношении, был разработан рентгеновский метод ее исследования, который позволил определить границы действия вакансионно-дислокационного механизма [52, 68].

6.6. Линейные и нелинейные системы

При трении в режиме граничной смазки создаются условия, которые диктуют системе поверхностного слоя линейный режим изменений — это линейное возрастание плотности дислокаций. Подобное состояние достаточно близко к равновесному, обладает устойчивостью и в сильной степени неупорядочено. В этом режиме имеется симметрия относительно обращения времени, и в устойчивом состоянии скорость производства энтропии минимальна. Поэтому спонтанные флуктуации не могут привести к эволюции системы в сторону повышения устойчивости и упорядоченности.

Иная ситуация возникает, когда отклонение от равновесия велико и не описывается линейным законом. Вынужденное отклонение от равновесия при избирательном переносе осуществляется путем создания некоторой концентрации атомов (дислокаций), которая благодаря изменившемуся химпотенциалу пленки вызывает ее избирательное растворение и понижает уровень энтропии. В результате неравновесные концентрации вакансий и дислокаций изменяются во времени по периодическому закону вокруг постоянного значения и возникает пространственно-временна́я структура "вакансионно-дислокационных волн". Эта нелинейная структура сохраняется все время, пока имеет место деформирование пленки и ее избирательное растворение. В основе этой структуры лежит кинетический фазовый переход от консервативного движения дислокаций к их неконсервативному переползанию к поверхности в условиях высокого насыщения вакансиями [52].

6.7. Переползание дислокаций

При граничном трении в поверхностном слое деталей постепенно происходит накапливание дислокаций, которые в дальнейшем объединяются, образуют трещины и в результате происходит изнашивание поверхности. Наличие на поверхности окисных пленок, отсутствие растворения поверхностного слоя способствуют накоплению дислокаций и это увеличивает конфигурационную энтропию.

Механизм переползания дислокаций в тонком поверхностном слое при деформировании в научной литературе известен как вакансионно-диффузионный механизм [1] и исследовался рядом авторов (С.Н. Журков, И.А. Одинг, В.С. Иванова, Е.Д. Щукин и др.). Это явление преимущественного пластического течения в поверхностных слоях кристалла в начальных стадиях его деформирования. Однако в дальнейшем в результате деформационного упрочнения и наличия окисных пленок создается барьер для выхода дислокаций на поверхность и процесс течения металла затормаживается.

При избирательном переносе поверхностный слой трущейся детали не имеет окисных пленок и поверхность растворяется, что снимает барьер для выхода дислокаций. Кроме того, в процессе избирательного растворения образуется поверхностно-активное вещество, пластифицирующее металл и уменьшающее объем деформируемого слоя до размеров микронной толщины [52]. В этой пленке диффузионные процессы возрастают во много раз, что создает гомогенную структуру и увеличивает концентрацию вакансий в деформируемом слое. Все это вызывает кинетический фазовый переход от консервативного движения дислокаций к переползанию. В этом случае под действием осмотических сил дислокации движутся перпендикулярно к поверхности и легко разряжаются [52]. Конфигурационная энтропия не накапливается.

6.8. Трибо-ПАВ

Поверхностно-активные вещества, образующиеся при избирательном растворении и каталитических процессах трибодеструкции смазочного материала в процессе трения.

6.9. Диссипативная система

Диссипативная система — это динамическая система, у которой полная механическая энергия (т.е. сумма кинетической и потенциальной энергий) при движении непрерывно уменьшается (рассеивается), переходя в другие, немеханические формы энергии (например, в тепло). При трении механическая энергия переходит в тепловую, тратится на пластическую деформацию, образование дефектов, упрочнение поверхностного слоя, его диспергирование (продукты износа) и др. Практически все системы, с которыми приходится реально сталкиваться в земных условиях, являются диссипативными системами.

Диссипативные системы не следует отождествлять с неконсервативными системами, в которых возможна не только диссипация энергии, но и приток энергии извне. Поэтому, например, в неконсервативных системах могут иметь место такие явления, как автоколебания, возникающие при равенстве расхода и притока энергии, что в диссипативных системах невозможно [34, 55].

6.10. Диссипативная структура

Диссипативная структура — это пространственная или пространственно-временнáя структура, сохраняющая и циркулирующая неопределенно долго во времени, для чего, кроме известных условий, требуется постоянная подача энергии и вещества. Диссипативная структура является открытой, стационарной, обратимой, неравновесной бесфинальной структурой, образующейся в гомогенной среде [55, 84].

Характеризуя открытую систему диссипативной структуры, итальянский физик Дж. Карери пишет: "Открытой системой мы будем называть систему, способную к обмену энергией и веществом с окружающей средой так, что потоки, входящие в систему и выходящие из нее, могут сместить ее состояние термодинамического равновесия и удержать вдали от него".

Например, в систему поступает химическое вещество с большим запасом свободной энергии, а покидают ее продукты с более бедной энергией [56]. Диссипативная структура поэтому должна состоять из встречных диффузионных потоков, реагирующих между собой в неравновесном состоянии, например атомов и вакансий.

В металле диссипативная структура может возникать не после любого фазового перехода, а только после кинетического перехода от консервативного движения дислокаций к их переползанию, что наблюдается в

известном явлении диффузионно-вакансионном механизме, действующего в режиме избирательного переноса.

Граничное трение является диссипативной системой, но не является диссипативной структурой. Происходящие процессы при граничном трении как разрушение и деформирование по своему определению являются эволюционными и необратимыми, несовместимы с понятием диссипативной структуры. Здесь нет обмена с внешней средой энергией и веществом. Диссипативная структура является высшей формой самоорганизации.

6.11. Условия возникновения диссипативной структуры

Из работ И. Пригожина, В. Эбелинга следует, что когерентное, согласованное поведение материала, приводящее к возникновению диссипативных структур, возможно лишь при наличии особых условий и взаимодействий:

1) большое отклонение от равновесия;

2) реализация принципа эволюции Пригожина—Гленсдорфа;

3) нелинейность основных процессов;

4) кооперативное поведение подсистем;

5) отбор и спонтанная самоорганизация в макромолекулярных системах;

6) постоянный поток отрицательной энтропии;

7) открытость системы для обмена веществом и энергией.

Ни одно из этих условий не соблюдается при трении с граничной смазкой. Явления, которые происходят в поверхностном слое металла, здесь идут линейно вблизи равновесия — имеется в виду накопление дислокаций. Однако создавать эти условия не пришлось — избирательный перенос обнаружили в готовом виде. Когда это произошло, установили, что развитие теории трения и износа поднялось на следующую более высокую ступень [52].

6.12. Неравновесность системы

Примером типичной неравновесности системы является состояние обычного потока газа, когда его плотность, гидродинамическая скорость и температура меняются от точки к точке.

Существование градиентов этих параметров приводит к переносу массы, импульса и энергии. Возникающие процессы переноса стремятся выровнять неоднородности в распределении плотности, скорости и температуры системы, приближая ее к равновесию.

Процессы переноса характеризуются соответствующими потоками. Например, градиент температуры выравнивает поток теплоты, градиент плотности — поток массы. В общем случае говорят, что потоки вызываются обобщенными термодинамическими силами (градиенты температуры или концентрации — простейшие примеры термодинамических сил)

[83]. Следует иметь в виду, что обобщенные термодинамические силы не имеют ничего общего с силами в ньютоновском понимании этого термина.

При трении в режиме избирательного переноса в качестве термодинамических потоков рассматриваются диффузионные потоки атомов, дефектов структуры, возникающие в защитной пленке при ее упрочнении и разупрочнении. Неравновесность этих потоков поддерживается градиентами их плотности, концентрации и температуры и регулируется обратной связью, возникающей в результате изменения химического потенциала пленки [13, 58].

6.13. Кооперативные явления в системе

Из неравновесной термодинамики следует, что, удаляясь от равновесного состояния, движение идет в сторону специфического и уникального. Вблизи состояния равновесия материя имеет много общих свойств. Вдали от него встречаются разнообразные структуры. При наличии цепочки неустойчивостей число путей к различным состояниям резко возрастает. При слабом отклонении от равновесия эволюция рано или поздно приводит к конечному результату (разрушению). Для открытых систем при значительном отклонении от равновесия ситуация иная. Если повышать степень неравновесности внешних условий, то будем иметь цепочку упорядоченных структур с постоянным уменьшением энтропии — кооперативные явления.

При избирательном переносе создается взаимодействие как макроскопических элементов — факторы снижения трения и износа (см. раздел "Физические основы эффекта безызносности") внешняя самоорганизация, — так и кооперативное взаимодействие микроскопических элементов — атомов, вакансий, дислокаций. Когда частицы устанавливают связь друг с другом на микроскопических расстояниях через макроскопические интервалы времени, имеет место внутренняя самоорганизация.

6.14. Лиганды, комплексные соединения, координационная теория

Лиганды — молекулы или ионы, связанные с центральным ионом в комплексном соединении. Комплексные соединения — соединения или ионы, которые образуются в результате присоединения к данному атому (или иону) нейтральных молекул или других ионов. Комплексные соединения многообразны и многочисленны. Координационная теория — теория комплексных соединений, согласно которой в молекуле любого комплексного соединения один из атомов (ионов), обычно положительно заряженный, занимает центральное место и называется комплексообразователем. Вокруг него в непосредственной близости расположено (координировано) некоторое число противоположно заряженных ионов или электронейтральных молекул, называемых лигандами; они образуют внут-

реннюю координационную сферу соединения. Остальные ионы, находящиеся на более далеком расстоянии от центрального иона, образуют внешнюю координационную сферу.

6.15. Открытая система избирательного переноса

При ИП в процессе деформирования сервовитной пленки образующиеся дислокации не накапливаются в ней, а под действием осмотических сил переползают к поверхности.

В местах выхода дислокаций на поверхности возникает зона возбужденных атомов (атомы со свободными химическими связями) из-за образования ступеньки" в месте выхода "ядра" дислокации. Продукты трибодеструкции смазки или специально добавленные в смазочный материал активные частицы — лиганды вступают в химическое взаимодействие с возбужденными атомами и последние теряют связь с металлом пленки. Энергия деформирования через возбужденные атомы переходит в химическую связь и не накапливается в пленке. Это явление А.А. Поляковым было названо ским-эффектом. Ским по-английски — "снимать пену". Таким образом, конфигурационная энтропия поддерживается на низком уровне.

Возникающее комплексное соединение образует ассоциаты – отдельные молекулы, которые создают смазочные пленки, адсорбированные на металлической (сервовитной) пленке. Благодаря нестабильности комплексного соединения часть его молекул снова распадается на лиганд и ион металла. Электрофоретические силы могут увлечь ион в зону контакта и там он коагулирует с пленкой. Таким образом, может осуществляться обмен веществом с внешней средой [34, 52].

6.16. Сервовитная пленка

Защитная металлическая пленка самопроизвольно образуется в зоне контакта трущихся деталей в режиме избирательного переноса. Пленка имеет особую структуру (в ней много вакансий и мало дислокаций), находится под воздействием трибо-ПАВ и подвергается вакансионно-дислокационному механизму.

6.17. Серфинг-пленка

Защитная адсорбированная пленка на основе ассоциации комплексных соединений, образующихся в результате перехода "свободных" атомов в местах выхода дислокаций в химическое соединение с лигандами смазочного материала, обеспечивая легкое скольжение при трении.

6.18. Металлоплакирующий смазочный материал

Термин появился в 1962 г. в связи с изобретением смазочного материала, реализующего эффект избирательного переноса — авторское свидетельство № 179609 от 14 мая 1962 г. (авторы Д.Н. Гаркунов, В.Г. Шимановский, В.Н. Лозовский).

Класс смазочных материалов, содержащих (по массе от 0,1 до 3 и более %) присадки: порошки металлов, сплавов и их окислов, соли и комплексные соединения металлов, металлорганические соединения. При использовании металлоплакирующей смазки реализуется эффект избирательного переноса, который проявляется в том, что на трущихся поверхностях деталей в процессе трения формируется пленка, трудно поддающаяся окислению. Пленка состоит из металлов, введенных в смазочный материал. Толщина пленки составляет от нескольких атомных слоев до 1—2 и более мкм. Пленку называют сервовитной.

Металлоплакирующие смазки применяют в тяжелонагруженных узлах трения качения и скольжения самолетов, автомобилей, текстильном и швейном оборудовании, металлургическом оборудовании, морском флоте и др.

Использование металлоплакирующих смазочных материалов позволяет повысить долговечность узлов трения (в 2—3 раза), снизить потери на трение (200%) и тем самым повысить КПД машин и оборудования, уменьшить расход смазочных материалов (в 2—3 раза), увеличить период между смазочными работами (до 3 раз).

Наибольшее распространение получили металлоплакирующие смазочные материалы, образующие медную, оловянную или свинцовую сервовитные пленки.

6.19. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО)

ФАБО — процесс нанесения защитной металлической пленки на стальную или чугунную поверхность. Покрытие находится в напряженном состоянии, способном при воздействии активного смазочного материала подвергаться избирательному растворению и создавать сервовитную пленку.

Основополагающим изобретением метода ФАБО является авторское свидетельство № 115744 от 23.4.58 г. "Способ придания поверхности металлов трущихся пар противозадирных свойств" (авторы Д.Н. Гаркунов и В.Н. Лозовский) [10].

Сущность процесса состоит в том, что стальные или чугунные детали после традиционной окончательной обработки резанием их поверхности (резание, шлифование, хонингование) покрывают тонким слоем (1... 4 мкм) латуни, меди или бронзы. Покрытие производят путем трения латунного, медного или бронзового прутка (инструмента) о поверхность детали, смазывая при этом поверхность трения технологической жидкостью. При трении материал инструмента переносится на стальную (или чугунную) поверхность детали.

Процесс переноса металла при трении ранее считался вредным явлением, поскольку он сопровождался интенсивным изнашиванием и повреждением трущихся поверхностей, особенно при сухом трении. При смазывании маслом этот процесс происходил в меньшей степени, лишь в отдельных местах контакта. Здесь большую роль играют окисные пленки, возникающие в зоне контакта и препятствующие непосредственному соприкосновению материала детали с инструментом.

Для того чтобы наносимый слой латуни был сплошным и ровным, необходимо, чтобы поверхность детали не имела окисных и масляных пленок, а материал латуни пластифицировался ПАВ в процессе нанесения покрытия. Давление прутка к поверхности детали должно обеспечить полное прилегание инструмента к поверхности детали. При таких условиях перенос материала с инструмента на деталь происходит сплошным слоем, состоящим из очень мелких частиц, хорошо сцепленных с поверхностью обрабатываемой детали и между собой [10].

В последние годы к.т.н. Г.И. Ежиев (Россия) и д.т.н., проф. Г. Польцер (Германия) разработали такие технологические жидкости, которые в процессе обработки деталей создают на поверхности детали сервовитную медную пленку с ее особой структурой.

ФАБО подвергаются шарнирно-болтовые соединения самолетов, детали топливной аппаратуры турбореактивных двигателей, подшипники качения, цилиндры и шейки коленчатых валов автотракторных двигателей, поверхности катания колес железнодорожного транспорта и др. детали.

Исследования свидетельствуют, что ФАБО деталей позволяет:

— снизить время приработки деталей;

— исключить задиры поверхностей трения;

— повысить несущую поверхность сочленений;

— защитить поверхности трения от водородного изнашивания;

— снизить температуру и продлить период работы узла трения при выключении подачи смазки;

— увеличить срок службы подшипников качения до образования усталостных повреждений [4, 5, 51].

6.20. Континуальное трение

Трение двух твердых тел при наличии на поверхностях трения сервовитной или другой пластичной металлической пленки, покрывающей выступы шероховатости поверхностей. При таком трении площадки контакта плоские и трение происходит без ударов шероховатостей — оно непрерывно.

6.21. Бифуркация

Бифуркация (от лат. bifureus — раздвоенный) в термодинамике означает возникновение новой устойчивой ветви решения. Это происходит при переходе за критическое значение термодинамических потоков и

сил. Например, при фазовых переходах скачкообразно возникают новые структуры с другими свойствами. Рассмотрим процесс, вызывающий систематическое отклонение от равновесия, например увеличение концентрации на границах [84]. Пусть изменение концентрации происходит в соответствии с рис.1.10.

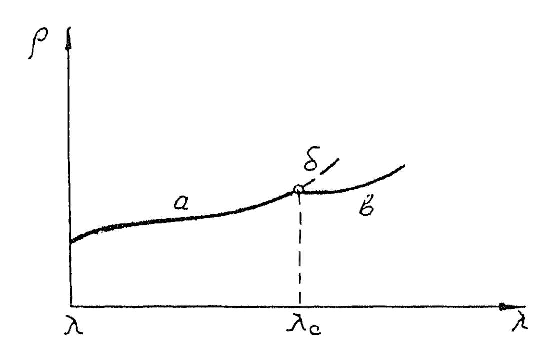


Рис. 1.10. **Ветвление решения по мере удаления системы от равновесия:**
λ – изменение некоторого характеризующего состояния; ρ – качественное изменение концентрации

Согласно теореме о минимальном производстве энтропии, близкие к равновесию стационарные состояния асимптотически устойчивы (ветвь *а*). В силу непрерывности эта ветвь, называемая термодинамической, простирается в конечной окрестности равновесного состояния. Однако после некоторого критического значения λ_c не исключена возможность того, что термодинамическая ветвь станет неустойчивой (ветвь *б*). В этом случае ничтожно малое возмущение уводит систему с термодинамической ветви. Новый устойчивый режим, устанавливающийся в системе, может соответствовать упорядоченному состоянию (ветвь *в*). Тогда можно сказать, что произошла бифуркация, при которой возникла новая ветвь решений.

7. Структура сервовитной пленки

Свойства медной пленки, "рожденной" в процессе трения, иные, чем у обычной меди, полученной восстановлением медных руд. Это различие обязано условиям образования пленки. Так, в узлах трения домашнего холодильника пленка меди образуется из ионов меди, поступающих в смазочный материал из медных трубок охладителя. Образуется она только в зоне трения при наличии смазочного материала и при невысокой температуре. Механизм ее формирования еще недостаточно выяснен, хотя свойства исследованы многими современными методами.

При трении пары бронза—сталь в среде глицерина пленка на поверхностях трения образуется в результате распада медного сплава (твердого раствора) при низких температурах, смазочный материал и сдвиговые деформации облегчают диффузионные процессы, чего нет при выплавке меди из руды. На первый взгляд, казалось бы, что трение может только

препятствовать процессу кристаллизации пленки (большие удельные нагрузки, сдвиговые деформации, вспышки температур). Однако электрохимические силы здесь превалируют перед механическими силами — пленка образуется и в этих стесненных условиях.

Структуру пленки исследовали различными методами.

7.1. Исследования на электронном микроскопе

На электронном микроскопе изучали пленку меди на стали и на бронзе, образовавшуюся при трении бронзы о сталь в среде глицерина. Фотографии поверхности пленки на электронном микроскопе ЭМ-7 получены с помощью угольно-серебряных реплик (рис.1.11).

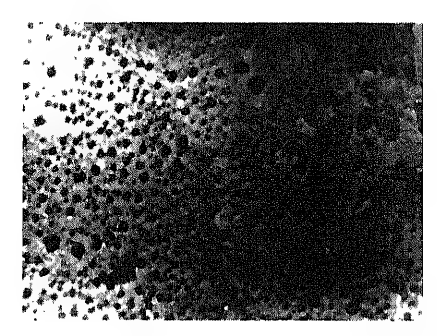


Рис.1.11. **Участок защнтной пленки, образовавшейся при избирательном переносе на бронзе БрАЖМц. (увел. 15000)**

Фотографии позволили установить, что сервовитная пленка имеет микропористость, причем некоторые поры имеют огранку. Это так называемые отрицательные кристаллы, которые образуются в результате коагуляции (слияния) вакансий, в избытке имеющиеся в пленке.

Таким образом, исследование пленки на электронном микроскопе показало, что пленка толщиной 1...2 мкм имеет рыхлую, пористую структуру. Этот вывод подтверждает следующий опыт. Тщательно промытый и высушенный образец с медной пленкой на поверхности выдержали в вакуумном шкафу. В результате на поверхности "выпотевал" глицерин, появление которого свидетельствовало, что в пленке находились поверхностно-активные компоненты смазочного материала.

7.2. Рентгеноструктурный анализ

Работы проф. д.т.н. Л.М.Рыбаковой и д.т.н. Л.И. Куксеновой

Для более глубокого изучения структуры сервовитной пленки Л.М. Рабакова и Л.И. Куксенова разработали метод исследования тонких поверхностных слоев с использованием "скользящего" пучка рентгеновских лучей [67]. Метод позволяет без разрушения поверхности прово-

дить послойный анализ исследуемых материалов путем только изменения угла между лучом и отражающей поверхностью. Изменяя этот угол, можно получить информацию о состоянии слоев материала разной (заданной) толщины (рис 1.12).

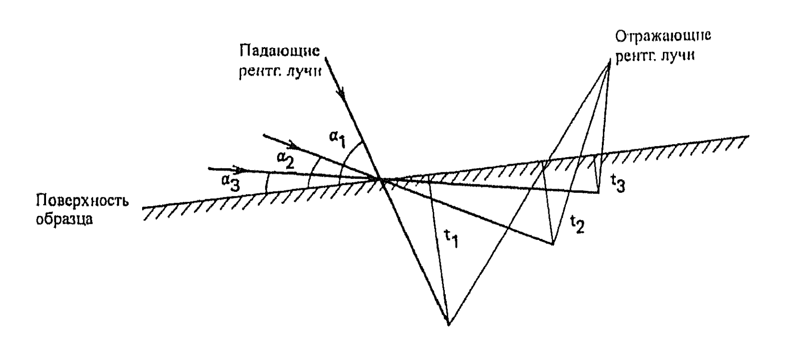


Рис.1.12. **Толщина слоев, анализируемых методом скользящего пучка рентгеновских лучей**

При $a \to 0$ толщина анализируемого слоя уменьшается, достигая малого значения при $a = 10'...30'$ (в зависимости от длины волны рентгеновских лучей λ и плотности материала). Указанные значения угла a являются предельными. При меньших a наблюдается явление полного внешнего отражения, не позволяющего получить интерференционную картину рентгеновских лучей от исследуемого материала. Для того чтобы получить информацию от слоев металла малой толщины и проводить послойное исследование с заданным шагом (сканирование по глубине), необходимо иметь узкий пучок лучей малой расходимости. Для этого авторы данного метода создали рентгеновскую камеру со специальным коллимационным устройством, которое обеспечивает формирование узкого и практически параллельного пучка рентгеновских лучей, падающих на исследуемую поверхность образца.

Небольшому коллективу энтузиастов под руководством Л.М. Рыбаковой удалось разработать рентгеновскую камеру, которая позволила исследовать деструкцию пластически деформированного металла на глубине до 0,1 мкм [65—68].

Ниже рассмотрены результаты анализа интерференционной картины на рентгенограммах, полученных при послойных съемках скользящим пучком рентгеновских лучей меди и ее сплавов, трение которых протекало в условиях избирательного переноса [69]. Особое внимание уделялось изменениям в тонких поверхностных слоях, измеряемых долями микрометра, и которые ранее в связи с отсутствием соответствующих методов для их анализа выпадали из поля зрения исследователей.

Пластическая деформация сервовитной пленки. Дислокационная и вакансионная структуры

Разработанный метод позволил определить ширину интерференционной линии β на рентгенограмме, которая содержит информацию о размерах блоков мозаики (единицы структуры, когерентно рассеивающей рентгеновские лучи), и микродеформации кристаллической решетки металла. Таким образом, величина β отражает один из основных процессов в металле, связанных с развитием дислокационной структуры в ходе пластической деформации и обуславливающих, в конечном итоге, разрушение поверхностных слоев.

Характер изменения величины β поверхностного слоя образца, работающего в условиях избирательного переноса, оказался неожиданным. Если при обычном трении ширина линий к поверхности возрастает, указывая на увеличение степени пластической деформации под влиянием действующего в контакте давления, то в условиях избирательного переноса она падает.

На рис.1.13, *а* представлены результаты изменения ширины интерференционных линий в функции времени испытания в слоях различной толщины меди, которая испытывалась на машине трения с возвратно-поступательным движением с постоянной нагрузкой и скоростью. Контртелом служила сталь 45, смазочной средой был глицерин. Это пара трения реализовала эффект безызносности. Как видно изменение β происходит в основном в поверхностных слоях, прилегающих к свободной (несущей) поверхности, т.е. в очень тонких слоях, измеряемых долями микрометра. И как следует из экспериментальных данных, ширина линий в функции времени испытания для этих слоев постепенно падает, и в установившемся режиме β в 1,6 раза меньше, чем в процессе приработки. Кроме того, по глубине образцов меди β изменяется монотонно (рис. 1.13, *б*). Максимальное значение ширины линии наблюдается не на самой поверхности, а в более глубоких слоях.

Сначала полученные экспериментальные данные вызвали недоумение: ширина линий на рентгенограмме поверхностных слоев вместо того чтобы расти в зависимости от степени пластической деформации, обусловленной трением (кривая 1, рис. 1.13, *б*), уменьшается до нулевого значения (кривая 2).

Здесь Л.М. Рыбакова [69] ставит вопрос, почему в процессе трения в режиме ИП поверхностные слои не накапливают соответствующей плотности дислокации, как это имеет место при граничном трении (см. рис.1.13, *б*, кривая 1). Это явление связывается с явлением эффекта пластифицирования — эффектом Ребиндера, который заключается в облегчении перемещения и размножения дислокаций, облегчении выхода дислокаций на наружную поверхность в присутствии ПАВ в смазке. Этот процесс происходит в слое металла, примыкающем к поверхности, и по толщине соизмерим со средней длиной дислокационных сегментов в кристалле. Именно от этих слоев, непосредственно взаимодействующих со смазочной средой и составляющих доли микрометра, была получена информация.

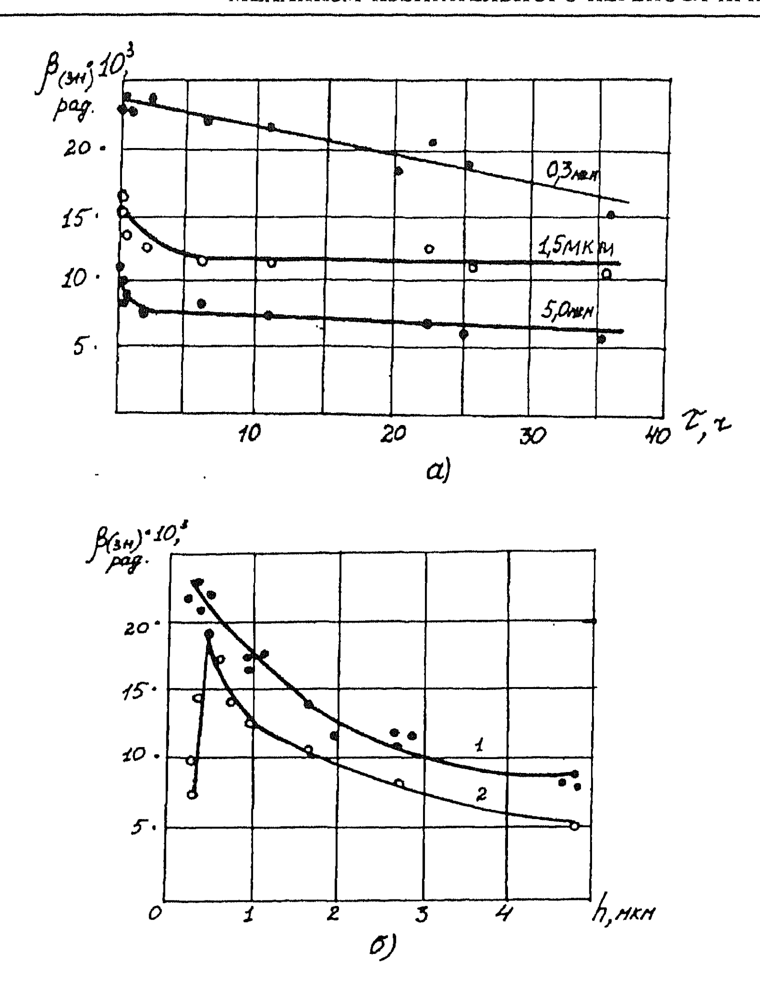


Рис.1.13. **Изменение физического уширения рентгеновских линий β в зависимости от времени испытаний (а) и глубины деформации (б) при обычном трении (кривая 1) и трении в режиме избирательного переноса (кривая 2)**

Таким образом, авторам разработанного метода исследования поверхностных слоев при трении впервые экспериментально было выявлено первичное взаимодействие ПАВ смазки на структурное состояние трущегося материала. Отсутствие размытия интерференционных линий на рентгенограмме свидетельствует о том, как пишет Л.М. Рыбакова [69], что плотность дислокаций в поверхностном слое при режиме избирательного переноса на 2...3 порядка ниже, чем у материала, трущегося в обычных условиях. Подвижность точек выхода дислокаций под действием ПАВ смазки приводит к их разрядке. Интенсивность последней усиливается наличием большого количества вакансий, образовавшихся вследствие избирательного растворения атомов кристаллической решетки, сопровождающего процесс трения при ИП.

Процесс разрядки дислокаций настолько интенсивен, что интерференционные линии на рентгенограмме не только не показывают ради-

ального размытия, но на них просматриваются отдельные пятна. Они свидетельствуют о формировании относительно больших по размеру областей металла, полностью свободных от искажений кристаллической решетки.

Обычно подобные интерференционные пятна наблюдаются при рентгеносъемке отожженного после деформации металла, в процессе его рекристаллизации. Оценка размера областей, свободных от искажений, в данном случае показала, что они возрастают в функции времени испытания почти на порядок (рис.1.14).

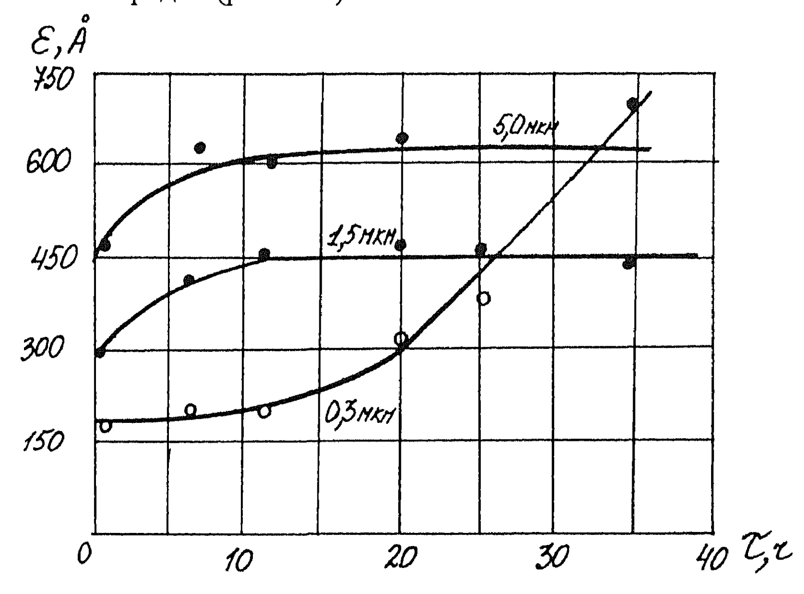


Рис.1.14. **Зависимость размера блока мозаики кристаллической решетки меди в слоях различной толщины от времени испытания при трении в условиях ИП**

Полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что высказанное ранее предположение о действии эффекта пластифицирования при ИП нашло свое обоснование и экспериментальное подтверждение.

Диффузионные процессы и параметр решетки. Вторым важным вопросом при изучении структуры ИП является процесс диффузии. В результате диффузии атомов кристаллической решетки происходит перераспределение элементов, составляющих сплав, изменения степени легирования по глубине поверхностных слоев, уход (растворение) элементов с поверхности, внедрение чужеродных атомов в кристаллическую решетку основного металла или, напротив, образование пустых мест (вакансий) в кристаллической решетке и др.

Все эти факторы влияют на интерференционную картину, формирующуюся при рентгеносъемке. В первую очередь они оказывают влияние на положение интерференционных линий — происходит сдвиг линий относительно их теоретического положения, вызванный соответствующим изменением параметра *a* кристаллической решетки металла.

Анализ местоположения линий на рентгенограммах, полученных от слоев металла разной толщины, позволил сделать следующие выводы. При трении медного сплава в условиях ИП происходит омеднение поверхностных слоев легирующими элементами — параметр *a* к поверхности уменьшается (рис.1.15). Более того, как пишет Л.М. Рыбакова, процесс растворения атомов сопровождается формированием на поверхности сплава новой металлической фазы с границей раздела с основным металлом.

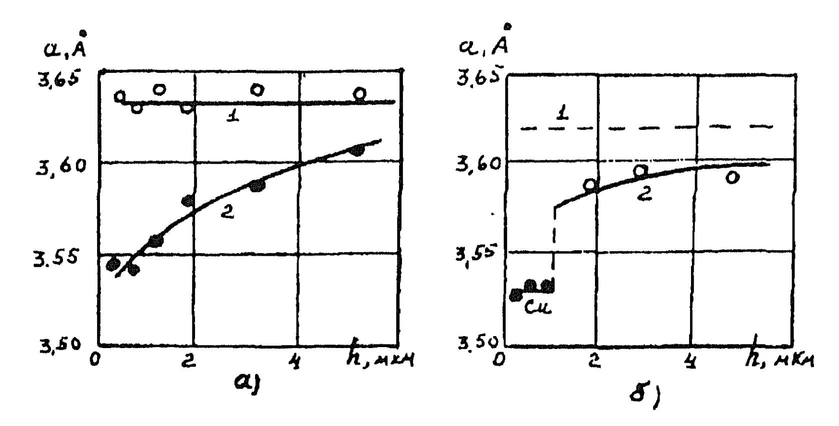


Рис.1. 15. **Изменение периода *a* кристаллической решетки латуни Л90(а) и бронзы БрАМЦ 9-2 (б) при трении в условиях избирательного переноса:**
1 — исходное состояние; *2* — после трения

Основанием для такого утверждения служат рентгенограммы, полученные при малом угле скольжения первичного пучка рентгеновских лучей от 0,5 до 1 градуса.

Анализ рентгенограмм показал, что эта пленка является металлической и имеет систему интерференционных линий, характеризующую ее принадлежность к меди.

Триботехнические испытания на машине трения с возвратно-поступательным движением (77МТ-1) показали, что режим безызносности будет реализоваться лишь в случае оптимального количества возникающих в цикле трения линейных и точечных дефектов кристаллической решетки металла (рис.1.16).

Отклонение от оптимального соотношения дефектов нарушает режим трения, вызывая либо повышенную плотность дислокаций, которая приводит к разрушению поверхностных слоев, либо к усиленному растворению трущегося металла — его коррозии. Следовательно, эффект безызносности можно реализовать только при сочетании определенных материалов, смазки и внешних параметрах (нагрузки, скорости, температуры, кинематики движения).

Обобщающие результаты закономерностей структурных изменений, диффузионного перераспределения легирующих элементов по глубине трущегося материала в смазочных средах разной природы подробно рассмотрены в работе [68].

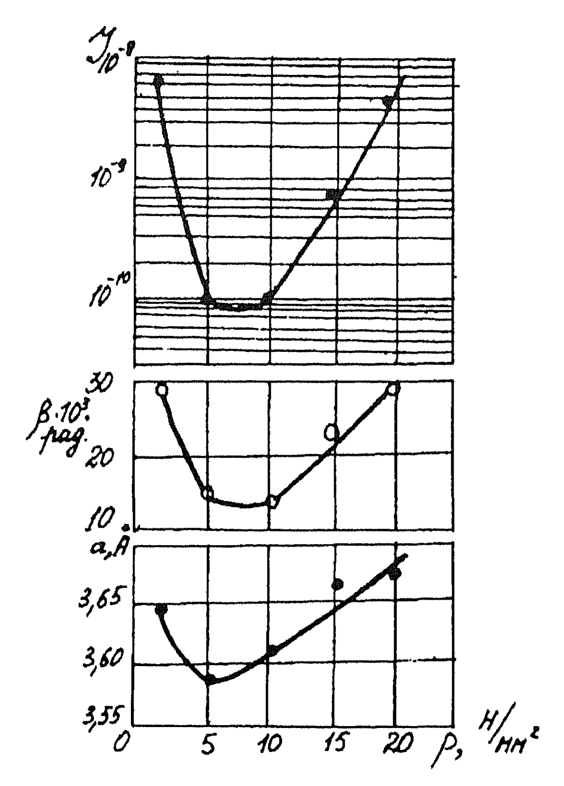


Рис.1.16. Зависимость интенсивности изнашивания I, физической ширины рентгеновской линии β и периода кристаллической решетки *a* сплава БрА5 от удельной нагрузки *p* при трении в масле АУ

Другие методы исследований структуры сервовитной пленки

Радиоизотопный анализ и метод ожеспектроскопии подтвердили полученные данные о перераспределении легирующих элементов сплава при трении. Они указывают на резкое различие содержания легирующих элементов в поверхностных слоях (вплоть до полного их растворения при формировании сервовитной медной пленки) при разных условиях трения, в частности при использовании смазочных сред разной природы [9].

Послойный эмиссионный микроспектральный анализ (с использованием лазерного луча) показал, что под сервовитной пленкой на границе со сталью имеется слой окислов меди, легирующих элементов или примесей толщиной около 0,1 мкм.

Физико-химические исследования структуры сервовитной пленки дали основание высказать предположение, что материал пленки находится в состоянии, подобном расплавленному. Она не способна к наклепу, имеет малые сдвиговые усилия, пориста. Пленка в поверхностной части не имеет окислов, способна к схватыванию, при трении ее частицы могут переходить с одной поверхности на другую, т.е. схватываться без образования повреждений и увеличения сил трения. Пленка может играть роль твердой смазки. Трение бронзы о сталь в условиях ИП можно

уподобить скольжению тела по льду, при котором низкий коэффициент трения вместо воды обеспечивает пленка расплавленного металла.

8. Физические основы (факторы) эффекта безызносности (ИП)

8.1. Общие сведения

Анализ физических процессов при ИП проводился в сравнении с процессами, происходящими при граничном трении — наиболее изученном и широко распространенном в узлах трения машин и механизмов. Ранее отмечалось, что при граничном трении основными факторами, определяющими износ поверхностей трения, являются:

— пластические деформации, приводящие к наклепу поверхностей и разрушению микронеровностей;

— окислительные процессы: образующиеся при трении окисные пленки, хотя и препятствуют схватыванию и глубинному вырыванию, хрупки и быстро разрушаются;

— внедрение отдельных участков поверхности одной детали в сопряженную поверхность другой, что при скольжении вызывает образование неровностей поверхностей и при многократном воздействии их разрушение;

— адгезионное схватывание, приводящее к переносу материала одной детали на другую и усиление изнашивания;

— наводороживание поверхностей трения деталей, что ускоряет изнашивание в зависимости от условий работы трущихся деталей более чем на порядок.

В связи с отмеченными факторами защита от износа должна быть многофакторной, вероятно, в некотором соответствии с перечисленными выше явлениями. Заметим, что применение для защиты от изнашивания только смазки хотя и предохраняет от схватывания (не весьма надежно), но не спасает от взаимного внедрения неровностей, пластического деформирования, окисления и разрушения окисных пленок и других необратимых процессов.

Если обратиться к биологическим процессам живых организмов, то для них характерным является многократное перекрывание и дублирование жизненно важной функции. В области же износа деталей машин имеется явная недостаточность предохранения и компенсации износа. Подтверждением недостаточности “однофакторного” подхода является то, что разработка в течение многих десятилетий огромного числа различного рода смазочных материалов и присадок к ним с целью снижения износа хотя и достигла эффективных результатов, но не дала возможности существенно поднять ресурс машин и механизмов. Одно только усиление адсорбционной (или хемосорбционной) защиты от адгезии в виде слоя смазки толщиной 0,1 мкм (что имеет место при граничном трении) не в состоянии устранить ни усталостные процессы, ни элементарное деформирование выступов шероховатостей.

Разрушение поверхностей деталей, как показал еще Л.В. Елин [19], может происходить и без разрыва тонкой пленки смазки в результате многократного взаимодействия шероховатостей поверхности. Переход к гладкой поверхности при граничной смазке вызывает масляное голодание и схватывание в зоне контакта.

При избирательном переносе защитные системы построены по принципу избыточности, так как сервовитная пленка поглощает деформацию, а внедрение неровностей практически отсутствует. Впадины между выступами шероховатостей поверхности заполнены веществом, обладающим свойствами смазки и способностью нести нагрузку, — сервовитной пленкой. Кроме того, это вещество не уносится из зоны трения, а лишь поступает туда и удерживается там, т.е. обладает свойствами сохранности. Именно такой многофакторной защитой отличается от граничного трения явление избирательного переноса (ИП).

Действительно, сервовитная пленка исключает взаимодействие шероховатостей поверхностей, а электрический заряд частиц износа возвращает частицы в зону контактного взаимодействия поверхностей.

Нужны также меры против окисления металлов, т.к. окисные пленки, разрушаясь при трении, составляют часть расхода металлов на износ. В режиме трения при ИП это достигается восстановительным характером химических процессов при трении.

Возникает необходимость преодолеть трудность, связанную с термической нестабильностью смазок и металлов. При ИП преодоление осуществляется путем усиленной интенсификации окислительных процессов продуктов трибодеструкции смазки и восстановлением окисных пленок меди до металла. Тогда создается возможность хемосорбции окисленных продуктов, образующихся в результате трибодеструкции смазочного материала на восстановленном металле с образованием комплексных соединений.

Свободное комплексное соединение (соединение, находящееся в масле) работает как ПАВ, в хемосорбированном виде оно создает прочный термодинамический защитный слой и, наконец, способствует обмену веществом сервовитной пленки со средой, хемосорбируясь на атомах со свободными связями, образующимися у выхода дислокаций. Таким образом, оно выполняет тройную функцию.

Далее более подробно рассмотрены факторы безызносности, которые проявляются в процессе ИП и обеспечивают малые силы трения и безызносность узлов трения. В работах А.А. Полякова эти факторы называются "системами снижения износа и трения" (СИТ). Такое название ближе подходит при рассмотрении ИП с термодинамических позиций. Поскольку в прежних изданиях книги "Триботехника" использовался термин "факторы безызносности", то и в этом издании остается этот термин.

8.2. Осуществление контакта поверхностей трения через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой металла

При обычном трении как без смазочного материала, так и при граничной смазке, детали контактируют на очень малой площади, составляющей 0,01...0,0001 номинальной площади сопряженных поверхностей. В результате участки фактического контакта испытывают весьма высокие напряжения, что приводит к их взаимному внедрению, пластической деформации и, следовательно, к интенсивному изнашиванию. Из приведенных на рис. 1.17 схем контакта стальной и бронзовой деталей видно, что если при граничном трении контакт сопряженных поверхностей происходит только в отдельных точках, то при ИП он осуществляется через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой металла. В результате площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей испытывает лишь упругие деформации.

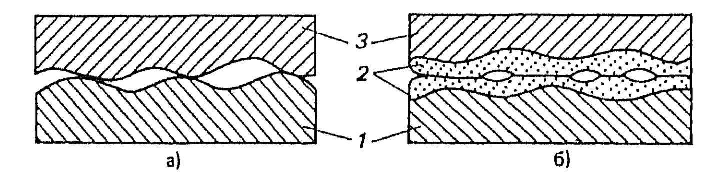


Рис.1.17. Схема контакта деталей при граничной схеме (а) и ИП (б):
1 — сталь; *2* — бронза; *3* — пленка меди

Толщина сервовитной пленки достигает 1...2 мкм, что соответствует размерам неровностей (или перекрывает их) большинства деталей общего машиностроения. При граничной смазке взаимодействие неровностей поверхностей вызывает усталостное изнашивание. При ИП трение непрерывное (континуальное), площадки контакта плоские. Имеющиеся методы определения площади контакта, формулы сближения поверхностей, кривые опорной поверхности, а также методы и приборы для исследования свойств контакта не годятся для условий ИП.

Помимо увеличения площади фактического контакта тонкие пленки мягкого металла сами по себе уменьшают трение между твердыми соприкасающимися поверхностями. Эффект пленки изучали Ф.Боуден и Д.Тейбор [7]. Их опыты по трению стального ползуна о пленку индия, нанесенной на инструментальную сталь разной толщины, показали, что имеется оптимальная толщина пленки, обеспечивающая минимум коэффициента трения. Нагрузка воспринимается через пленку, которая не выдавливается и предохраняет поверхности трущихся тел от непосредственного контакта. Срез происходит в мягком металле (в случае схватывания пленки и материала ползуна).

При уменьшении толщины пленки сила трения убывает (рис.1.18), но при толщине около 0,1 мкм наступает предел, с переходом за который трение начинает возрастать, а при толщине 0,01 мкм, как указывают авторы, пленка перестает быть эффективной. Вероятно, вследствие того что

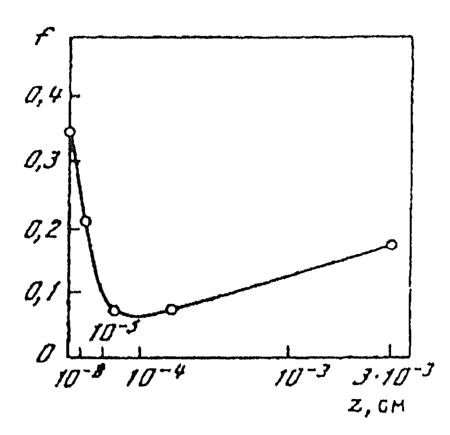


Рис. 1.18. **Зависимость коэффициента трения от толщины тонкой пленки индия, нанесенной на инструментальную сталь [7]**

при очень тонких пленках из-за недостаточной их равномерности отложения не исключается наличие участков без индия.

Металлические пленки могут выдерживать весьма высокие нагрузки без разрушения, тем не менее исследования показывают, что после многократного прохождения ползуна по пленке индия она начинает разрушаться. Опыты проводились для пленок индия, нанесенных на серебро и пленок свинца, нанесенных на сталь и медь. Во всех случаях величина нагрузки, при которой происходило разрушение пленки, зависит от толщины пленки, ее адгезионной прочности по отношению к нижележащей основе и от твердости последней. Эти опыты подтверждают свойство мягкой металлической пленки снижать трение и износ.

Помимо действия самой тонкой мягкой пленки выдвигается требование твердой подложки. В сумме эффект пленки и подложки локализует деформирование в пластичном материале. Практика триботехники подтверждает целесообразность такого разделения функций поверхностного слоя. Нанесение тонкого слоя индия гальваническим способом на тяжелонагруженные бронзовые подшипники скольжения авиационных поршневых двигателей широко применялось в ремонтных предприятиях в 50-е годы.

Пленка, образующаяся в процессе трения при ИП, содержит большое количество вакансий, что делает ее полужидкой. Такая структура пленки снижает трение и исключает ее наклеп. Материал пленки с повышенной концентрацией вакансий достигает особого критического состояния, когда скопление дефектов становится неустойчивым и повышение температуры или концентрация вакансий вызывает процесс типа кристаллизации [68].

Источниками вакансий в пленке, как пишет А.А. Поляков [52], могут быть:

— эффект растворения сплава в процессе трения в активной среде;

— деформирование пленки в повторном цикле растяжение—сжатие;

— эффект растворения пустот на поверхности и в порах в восстановительных условиях;

— повышенная концентрация вакансий тонкопленочного объекта.

Особенностям тонких пленок, отличающихся от их массивного состояния, посвящена обширная литература [7, 70, 76].

8.3. Предотвращение процесса окисления металла на поверхностях трения

При трении с граничной смазкой и трении без смазочного материала поверхности деталей всегда покрыты окисными пленками (рис.1.19), которые, как известно, предотвращают непосредственный контакт металлических поверхностей и их схватывание при разрушении масляных пленок. Масляные пленки чаще всего разрушаются при температурных вспышках в зоне непосредственного контакта шероховатостей.

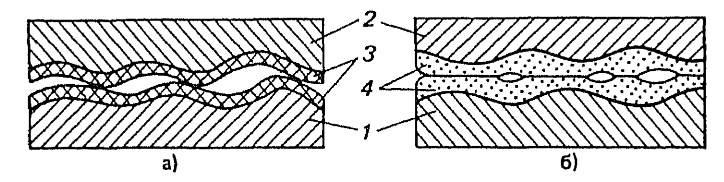


Рис. 1.19. **Образования на поверхности контакта деталей при граничной смазке (а) и ИП (б):** *1* — сталь; *2* — бронза; *3* — окисные пленки; *4* — сервовитные пленки

Однако окисные пленки хрупки, не способны многократно деформироваться, поэтому в процессе трения разрушаются в первую очередь, в результате чего их защитное действие ослабевает. С повышением температуры в зоне трения окисные пленки утолщаются, но при этом увеличивается объем их разрушения.

В режиме ИП трение происходит без окисления поверхностей и поэтому не сопровождается образованием окисных пленок. Защиту поверхностей от окисления выполняют плотные слои положительно заряженных адсорбированных поверхностно-активных веществ, которые образуются в процессе трения и предотвращают поступление кислорода к сервовитной пленке. Отсутствие окисных пленок уменьшает работу выхода электрона и способствует протеканию хемосорбционных процессов, в результате создается дополнительная защита от изнашивания.

При обычном трении окисные пленки препятствуют выходу дислокаций на поверхность, это усиливает наклеп поверхностного слоя и его разрушение. Сервовитная пленка не наклепывается и может многократно деформироваться без разрушения, так как при отсутствии окисных пленок дислокации в ней легко выходят на поверхность и разряжаются. Поскольку пленка еще и пориста, то дислокации могут разряжаться в поры самой пленки.

Интересный опыт проведен А.А. Поляковым для доказательства того, что при ИП не происходит окисление поверхностей трущихся деталей. Он показал, что при трибодеструкции и окислении углеводородов смазочного материала может образовываться ряд восстановителей вплоть до водорода. Это подтверждает эксперимент с медным диском, подвергну-

тым высокому отжигу (1020°С), в результате которого он покрывался темным оксидом меди стекловидной структуры толщиной 0,15 мм. Диск был установлен в машину трения АЕ-5, где по его поверхности терлись три стальных образца при смазке глицерином. В процессе трения на окисленных поверхностях трения и стальных образцов образовывался тонкий слой меди. Пленка оксида меди не была изношена до основного металла. Химическим путем в продуктах деструкции глицерина были обнаружены акролеин, муравьиный альдегид и некоторые другие соединения, которые легко восстанавливают оксид меди.

8.4. Реализация эффекта Ребиндера

Почти все смазочные материалы содержат поверхностно-активные вещества (ПАВ), что предопределяет возможность пластификации поверхностных слоев материалов трущихся деталей и снижения сил трения в результате действия эффекта Ребиндера. При обычном трении окисные пленки препятствуют проникновению среды (а в месте с ней и ПАВ) к металлу, чем снижается эффект Ребиндера; в результате пластические деформации участков контакта охватывают более глубокие слои (рис.1.20, *а*).

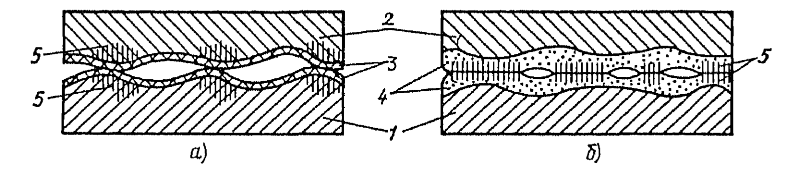


Рис.1.20. **Схема распространения деформаций в местах контакта при граничной смазке (а) и ИП (б):**
1 — сталь; *2* — бронза; *3* — окисные пленки; *4* — сервовитные пленки

При ИП оксидные пленки отсутствуют и действие эффекта Ребиндера реализуется в полной мере, в результате деформируется лишь сервовитная пленка; подповерхностные слои металла деформации не претерпевают (рис. 1.20, *б*). Поскольку молекулы ПАВ находятся в порах сервовитной пленки, не исключается скольжение и внутри пленки по принципу диффузионно-вакансионного механизма, но с малой затратой энергии. Все это снижает трение и изнашивание.

8.5. Перенос частиц с одной поверхности трения на другую и удержание их в зоне контакта

Продуктами износа при трении в условиях граничной смазки являются в основном окислы, которые не имеют электрического заряда, свободно уносятся из зоны трения и, перемещаясь между контактирующими поверхностями, оказывают на них абразивное действие (рис.1.21, *а*). По-

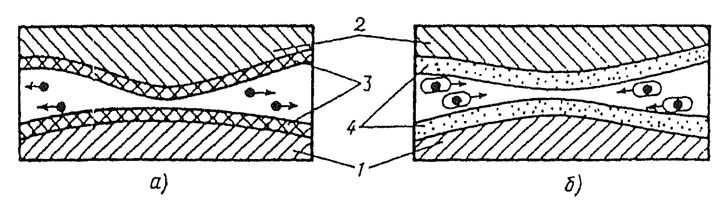


Рис. 1.21. **Схема движения частиц износа в зоне контакта при граничной смазке (а) и ИП (б):** *1* — сталь; *2* — бронза; *3* — окисные пленки; *4* — сервовитные пленки

этому конструкторы и специалисты по эксплуатации машин стараются принять все меры по удалению продуктов износа из зоны контакта и всей смазочной системы.

При наличии на поверхностях трения сервовитной пленки продукты износа состоят из меди и др. металлов; их поверхность пориста и весьма активна, поэтому частицы покрываются адсорбционным слоем ПАВ. Такие частицы (мицеллы) имеют электрический заряд и под действием его сосредотачиваются в зазоре (рис1.21*б*). Кроме того, при ИП частицы могут переноситься с одной поверхности трения на другую (схватываться), не вызывая повреждения этих поверхностей.

При ИП процессы схватывания материала сервовитной пленки с основой не являются вредными, как при обычном трении.

В начальной стадии ИП образующиеся ПАВ интенсифицируют процесс поверхностного диспергирования. Адсорбируясь на диспергированных частицах, ПАВ образуют устойчивую дисперсную систему (создание мицел). Этому способствуют процессы полимеризации, поликонденсации и трибодеструкции. Благодаря разности потенциалов между зоной контакта и остальной поверхностью мицеллы будут иметь направленное движение в зону контакта (электрофорез), где, разряжаясь, будут создавать медный слой — сервовитную пленку.

Так как мицеллы — это электрически заряженные частицы, имеющие слои адсорбированных молекул ПАВ, то остаточный после разрядки их заряд способен вызвать между сопряженными пленками кулоновские силы отталкивания [52].

Снижению адгезии будет способствовать также то, что молекулы ПАВ расположены в мицелле радиально, и при нагружении их взаимодействие с подложкой будет значительно слабее, чем если бы они располагались по плоскости.

Электрофорез компенсирует потерю диспергированных частиц пленки, возвращая их в зону контакта. Это относится к частицам коллоидного размера, которые в установившемся режиме составляют основную массу частиц [52].

Важным случаем является перенос ионов и более крупных заряженных частиц к месту фрикционного контакта в электрохимическом процессе между зоной контакта и остальными поверхностями (иногда даже не участвующие в трении). Это относится ко всем электропроводным сма-

зочным материалам — растворам кислот, солей, а также к углеводородам, содержащим электропроводные добавки. Сюда же относится и осаждение частиц меди в зоне фрикционного контакта, переносимых в смазочной системе холодильников потоком фреона из мест слабого коррозионного растворения материала медных трубок системы охлаждения.

Еще приведем один пример переноса меди и ее осаждения на поверхности трения уплотнительных колец, используемых в химическом оборудовании. Поверхности трения уплотнительных колец, изготовленных из коррозионно-стойких сталей 14Х17Н2, 12Х18Н10Т и др., при смазывании раствором серной кислоты в процессе работы покрывались пленкой меди. Пленка меди формировалась из ионов меди, находящихся в растворе серной кислоты. Ионы же меди в серную кислоту "поставляли" детали, находящиеся в контакте с серной кислотой, не участвующие в трении, но содержащие небольшое количество меди (могут быть даже примеси). Работа выполнена Б.Д. Воронковым.

На рис.1.22 показано одно из колец торцевого уплотнения, изготовленного из твердого сплава ВК-6, рабочая поверхность которого покрыта тонкой пленкой меди, образовавшейся при трении кольца в 5%-м растворе серной кислоты.

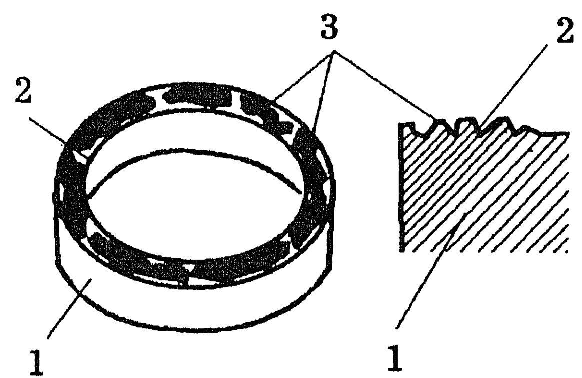


Рис.1.22. **Кольцо торцового уплотнения из твердого сплава ВКв:**
1 — кольцо; *2* — поверхность трения; *3* — пятна меди (по Воронкову Б.Д.)

В данном случае в начале работы торцевого уплотнения ни в кольцах, ни в смазочной среде меди не было. Ионы меди в растворе серной кислоты появились после растворения в кислоте стальной детали, крепившей одно из уплотнительных колец. В этой детали медь находилась как примесь, без специального легирования.

8.6. Образование продуктов полимеризации смазочного материала на поверхности сервовитной пленки

Для повышения несущей способности смазочной пленки при трении в смазочный материал вводят специальные добавки (например, смесь метилового спирта многоосновной кислоты и полиамидов), которые при

трении полимеризуются и создают на поверхностях трения дополнительный защитный слой, предотвращающий их от непосредственного контакта. Однако в условиях граничного трения такая пленка образуется с трудом, так как окисная пленка препятствует (будучи инактивной) реакции поликонденсации и полимеризации (рис.1.23, *а*).

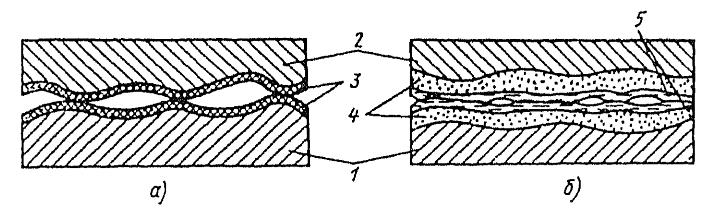


Рис. 1.23. **Схема контакта деталей при наличии смазочного материала со специальными присадками при граничной смазке (а) и ИП (б):**
1 — сталь; *2* — бронза; *3* — окисные пленки; *4* — сервовитные пленки; *5* — полимерные пленки

При ИП окисные пленки отсутствуют и сервовитная пленка является мощным катализатором полимеризации. Полимерная пленка образуется из свободных радикалов органических веществ, которые возникают в процессе трибодеструкции смазочного материала (рис.1.23, *б*). Образовавшаяся полимерная пленка предотвращает непосредственный контакт металлических поверхностей и снижает пиковые давления.

Ранее было сказано (см. стр. ..), что при трении пары бронза—сталь в среде глицерина в результате химических превращений последнего может происходить образование высокомолекулярных соединений, а также полимеров трения. Образующийся каркас из полимерных молекул дополняет ранее рассмотренные факторы, снижающие трение и износ деталей при ИП. Кроме того, в случае полимерного образования, имеющего полужидкую консистенцию [52], коэффициент трения близок к коэффициенту жидкостного трения. И, как известно, дублирование механических операций является одним из основных положений теории надежности. Здесь полимерная пленка дублирует сервовитную.

8.7. Защита поверхностей трения от водорода

Водородное изнашивание [21] по масштабам проявления занимает одно из первых мест среди всех видов изнашивания. Водород образуется (см. главу 6, ч. I) в процессе трения как продукт разложения водяных паров, топлив, смазочных материалов, смазочно-охлаждающих жидкостей, а также при деструкции в зоне контакта полимеров. Водород легко диффундирует в глубь металла, способствует образованию зародышей трещин в результате молизации в дефектах решетки и, в конечном счете, вызывает разрушение поверхностного слоя детали (рис. 1.24). Когда атомы водорода молизуются, в дефектах возникает своеобразная ловушка, так как молекулы, обладая большими размерами, чем атомы, не могут выйти из дефекта, и давление благодаря поступлению новых атомов в дефект воз-

растает до больших значений [54]. Возникшие напряжения, складываясь с напряжениями от трения, вызывают разрушение поверхностного слоя деталей.

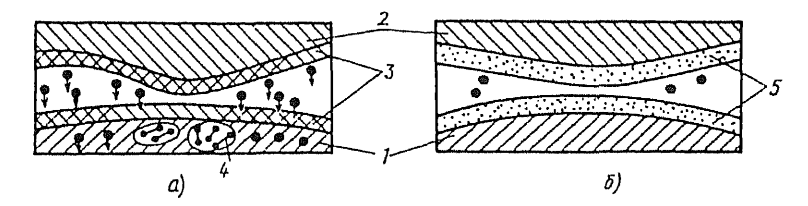


Рис. 1.24. **Схема движения водорода в зоне контакта при граничной смазке (а) и ИП (б):**
1 — сталь; *2* — бронза; *3* — окисные пленки; *4* — скопление ионов водорода и их молизация; *5* — сервовитные пленки

Водородное изнашивание, как правило, сопровождает абразивное, коррозионно-механическое изнашивания, фреттинг-коррозию и др.

Поскольку изучение водородного изнашивания только началось, методы защиты от него для многих деталей еще не разработаны, и пока наиболее эффективной защитой является ИП. Образующаяся при ИП медная пленка снижает нагрузку до уровней, при которых образования водорода практически не происходит. Кроме того, медная пленка является хорошей защитой от проникновения водорода в сталь (рис. 1.24, *б*)

8.8. Возбуждение кристаллической решетки

Отличительной особенностью ИП от граничного трения является значительное возбуждение поверхностного слоя кристаллической решетки металла [58]. Трение возбуждает поверхностные слои, вызывая их химическую активизацию и возбуждение экзоэлектронной эмиссии. Оно возбуждает и подповерхностные слои и вызывает движение дислокаций при деформировании. Все это относится к слабо неравновесным системам.

Для осуществления избирательного переноса необходимо состояние кристаллической решетки, далекое от равновесия. Имеется в виду использование нового фактора — квантовой структуры энергетического состояния термов.

Когда сплав избирательно растворяется в процессе деформирования, возникает высоко неравновесная концентрация вакансий, ускоряющая диффузию на порядки, возбуждая атомы решетки. В этих условиях становится возможным кинетический фазовый переход от консервативного движения дислокаций к переползанию, что является решающим при бездефектном деформировании поверхностного слоя (сервовитной пленки).

Подложка имеет фазовую границу с металлической пленкой (исследования Л.М. Рыбаковой и Л.И. Куксеновой). В пленке химическая реакция между радикалами и атомами доходит до конца и в результате образуется ПАВ. Высокая подвижность материала пленки обеспечивает завершение реакции и образование вакансий на место вступившего в реак-

цию атома. При этом реализуется необходимый для понижения трения разрыв непрерывности свойств между пленкой и основным металлом, который пластически не деформируется, а лишь упруго поддерживает подвижную пленку; вся деформация сосредотачивается в пленке.

При деформировании сервовитной пленки образуются дислокации. Пленка тонкая и при ее деформировании дислокации выходят на поверхность; они разряжаются и активизируют поверхность. В связи с этим явлением возникла дислокационная теория активации схватывания металлов [26]. При избирательном переносе этого не происходит, так как возникают благоприятные условия для образования координационных соединений. Прежде чем наступит схватывание, возникает химическая реакция (которая более термодинамически вероятная, она и предупреждает схватывание) между активной поверхностью пленки и молекулами смазочного материала. Активация поверхности особенно резко увеличивается, как показал О.Н. Курлов [38], при возвратно-поступательном и возвратно-вращательном движениях, т.е. тогда, когда поверхность трения испытывает растягивающие напряжения. В этих условиях резко снижаются коэффициент трения и износ.

На основании расчета [26] построена энергетическая модель состояния атомов (рис. 1.25), по которой можно оценить площадь активного центра, образованного при выходе дислокации на поверхность и число атомов в нем. Такая оценка показывает возможность высокой активности этих участков поверхности в отношении хемосорбции.

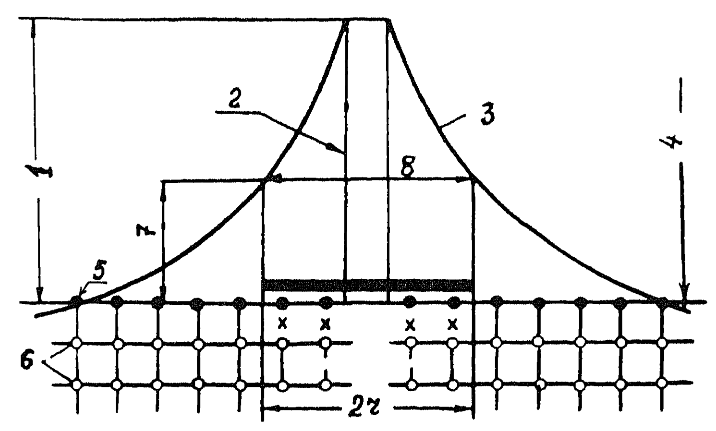


Рис. 1.25. **Модель активного центра, образованного при выходе дислокаций на поверхность:** *1* — энергия поля искажений; *2* — ядро дислокаций; *3* — поле искажений; *4* — средний энергетический уровень атомов; *5* — кислород; *6* — металл; *7* — потенциальный барьер; *8* — активный центр; *r* — радиус действия энергии дислокаций; *x* — разорванные связи атомов

Химически активные компоненты смазки — лиганды — образуют на площадках выхода дислокаций (местах контакта) медные комплексы, в частности, объемной или плоской структуры [26] (рис. 1.26). Образование в комплексе координационной связи приводит к ослаблению и разрыву связи атома металла в комплексе с атомами металла в решетке.

Связь между металлом и комплексом переходит в адсорбционную. Комплекс получает возможность двигаться по поверхности, соединяясь с другими комплексами в островки пленки. Схематически островок изображен на рис. 1.26, *б*. Образование таких островков подтверждено рентгеноструктурным анализом [30, 34]. Пленки подобного строения имеют ряд особенностей, присущих только условиям трения в режиме ИП. Такие пленки А.А. Поляков назвал "серфинг-пленками" (от английского слова, означающего скольжение по волне). Серфинг-пленки осуществляют " коллективное" адсорбционное действие, пластифицируя металл, что в обычных условиях трения затрудняется (ингибируется) пленками окислов.

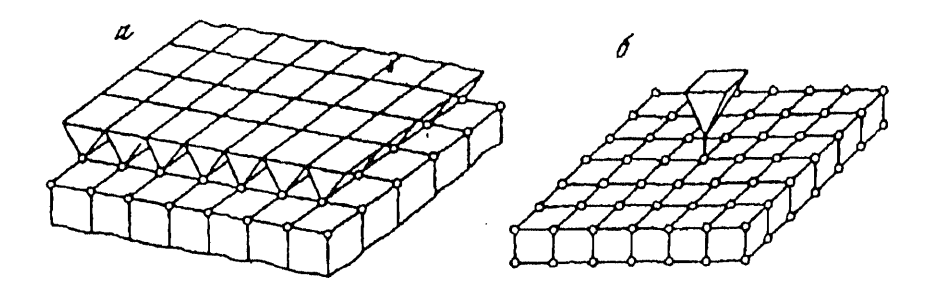


Рис. 1.26. **Образование серфинг-пленки из молекул комплексного соединения:**
а — комплексы по всей поверхности; *б* — одиночный комплекс

Трение при ИП создает повышенную на два порядка концентрацию вакансий и, следовательно, резко увеличивает концентрацию локализованных носителей заряда на них, что создает широкий диапазон видов хемосорбции.

Разложение комплексов в пленке в результате повышения температуры дает выделение меди и осаждение ее на поверхность. По данным А.С. Кужарова [30, 34] скорость образования комплексов в установившемся режиме трения равна скорости его распада. Осажденные и разрядившиеся ионы металла образуют снова материал пленки. Этому помогает явление электрофореза, благодаря которому ионы втягиваются в зазор между трущимися деталями, а не теряются со смазкой. Возникает своеобразный ионный обмен, сохраняющий материал пленки.

9. Влияние металлоплакирующих присадок на окисление и вязкость масел

Работы д.т.н. В.Г. Бабель

9.1. Состояние вопроса

Срок службы смазочного масла зависит от его способности противостоять окислению (старению), т.е. изменению физико-химических показателей и эксплуатационных свойств с течением времени в процессе применения и хранения. Противоокислительная стабильность масла является одним из важнейших свойств, определяющих его долговечность.

Чем меньше стабильность, тем чаще его нужно будет менять в эксплуатации. Старение масла происходит в результате его окисления кислородом воздуха. Поэтому срок службы любого смазочного масла, если оно не загрязняется продуктами износа и абразивом, определяется его противоокислительной устойчивостью [63].

Под воздействием температуры и кислорода в масле образуются первичные и вторичные продукты окисления:

1. Карбоновые и оксикарбоновые кислоты, повышающие кислотное число масла, что приводит к коррозионной агрессивности масла.
2. В результате полимеризации и поликонденсации вторичных продуктов окисления возрастает содержание в масле смол, асфальтенов, карбенов и карбоидов, способствующих осадкообразованию.
3. С накоплением смолообразных продуктов в масле увеличивается его вязкость по сравнению с исходной [63].

В литературе отмечается, что скорость окисления масел может значительно повыситься в присутствии металлических катализаторов — меди, свинца, олова, железа, марганца, хрома, ванадия.

С целью уменьшения окисления масла даются рекомендации по исключению применения в маслопроводах медных трубок, латунных фитингов, антифрикционных сплавов, свинца в составе вкладышей подшипников [23].

В качестве примера влияния металлов на окисление масла приведем результаты экспериментов, представленные в табл.1 [41].

Таблица 1

Каталитическое действие металлов на окисление масел кислородом при 120°С

Продолжительность опытов 70 ч

Показатель	Исходное масло	После окисления в присутствии					
		без металла	свинец	медь	олово	железо	цинк
Кислотное число, Мг КОН/г	0,06	0,06	11,8	0,17	0,07	0,06	0,06
Содержание смол, %	0	0	29,3	2,5	1,3	0,6	0,8

Предполагается, что при эксплуатации машин окисление смазочного масла ускоряется вследствие контакта его со смазываемыми поверхностями из таких металлов, а также от каталитического воздействия попадающих в масло продуктов коррозии и износа поверхностей трения.

При разработке металлоплакирующих присадок к маслам, реализующим избирательный перенос при трении, у специалистов по смазочным материалам возникло возражение, а именно: образующаяся сервовитная пленка из меди на стальных поверхностях будет усиленно окислять масло, что снизит его срок службы. Это особенно будет происходить с маслами, применяемыми в теплонапряженных двигателях внутреннего сгорания. Кроме того, с введением медьсодержащей присадки в масло повысится скорость окисления и увеличится его вязкость, что неблагоприятно скажется на пусковых качествах двигателя внутреннего сгорания или другой машины. Другими словами, медьсодержащая присадка к маслу принесет только вред — ухудшит эксплуатационные свойства масла.

Эти вопросы обсуждались в конце восьмидесятых годов на семинаре по химмотологии, проводимом в Московском доме научно-технической пропаганды, где один из ведущих специалистов по смазочным материалам сказал, что медьсодержащую присадку нельзя допустить к двигателям внутреннего сгорания на "пушечный выстрел", что было воспринято большинством химмотологов аплодисментами. Однако, как будет показано далее, такое категоричное заявление было ошибочным.

Ответы на указанные вопросы можно найти в докторской диссертации В.Г. Бабель "Композиции, улучшающие антиокислительные свойства и смазочную способность масел" (Технологический институт им. Ленсовета, Ленинград) и ее публикациях [2, 17].

9.2. Разработка металлоплакирующей присадки к маслу

В диссертации В.Г. Бабель и опубликованных статьях совместно с М.Д. Байрамуковым [3] рассматривается возможность применения неорганических солей — галогенидов металлов переменной валентности в качестве добавок к маслам для улучшения триботехнических свойств поверхностей трения.

Поскольку галогениды металлов практически нерастворимы в минеральных маслах, то для получения маслорастворимой среды подбирали такие органические соединения, которые относительно хорошо растворяют соли и совмещаются с маслами, давая стабильные композиции. Этим требованиям лучше всего отвечают алифатические спирты. В качестве металлосодержащей добавки исследовались хлориды, бромиды, иодиды переходных металлов (медь, хром, олово, цинк, железо и др.), растворимость которых была проверена как в полиспиртах (глицерин, этиленгликоль), так и в одноатомных спиртах (бутанол, октанол), а также в промышленной фракции алифатических спиртов.

Спиртовые растворы галогенидов металлов вводились в базовое масло М-11 (ТУ 38 10123—75) в таком количестве, чтобы содержание солей в масле составило 0,3...1,0%. Полученные смазочные композиции проверяли на стабильность по выпадению осадка при хранении в течение семи суток при 18...20°С. Несмотря на бо́льшую растворимость солей в бутаноле и глицерине, смазочные композиции на основе этих спиртов оказались менее устойчивыми. Лучшей стабильностью обладали составы, содержащие галогениды металлов, введенные во фракции алифатических спиртов; причем большей устойчивостью в маслах отличались бромиды и иодиды.

Бо́льшую часть исследования авторы проводили со смазочными композициями, в которых неорганические добавки представлены хлоридами олова и меди. Их стабильность характеризовалась по наличию осадка в колбе после хранения в течение 6 месяцев при 18...20°С. Хлорид меди, введенный в масло в растворе бутанола или глицерина в количестве 1,0; 0,5; 0,3%, выпадал в осадок уже после 10 суток хранения. Высокую стабильность показали смазочные композиции, содержащие хлорид олова. При содержании соли в масле 1,0% в течение 180 суток никакого расслоения не наблюдалось, а при содержании ее 0,5% масло было однородным.

Негативным свойством этих композиций является их повышенная кислотность, что может оказать коррозионное действие на трущиеся детали. Для снижения кислотности в композиции добавляли промышленные присадки: антикоррозионную АКОР-1, многофункциональную ВНИИ НП-360 и ДФ-11 и синтезированную в лаборатории полифункциональную присадку 2-иминозамещенное индолина.

9.3. Оценка антифрикционных свойств масел с разработанными добавками

Испытания по определению антифрикционных свойств разработанных добавок авторы работы провели на машине трения МИ-1М. Испытанию были подвергнуты стальные образцы колодка—ролик. Кривые зависимости момента трения Мтр от удельной нагрузки Р представлены на рис. 1.27. Для сравнения приведены кривые, полученные с органическими солями меди.

При смазывании маслом, содержащим ацетат или нафтенат меди, схватывание поверхностей трения наступало уже при нагрузке 5,0 МПа. При смазывании маслом со спиртовыми добавками галогенидов меди и олова (кривые 4 и 5) при увеличении удельной нагрузки до 12,5 МПа момент трения практически не изменялся и оставался на низком уровне. Как видно, наибольшую эффективность в повышении трибологических свойств масел имеют добавки с неорганическими солями.

Высокая эффективность галогенидов олова и меди побудила авторов к исследованию возможности их использования в качестве приработоч-

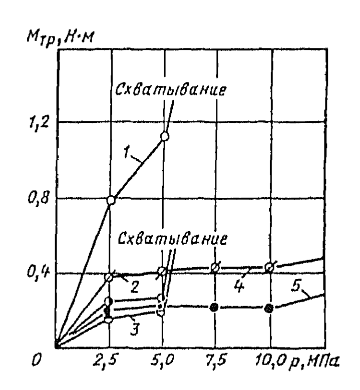


Рис. 1.27. **Работоспособность пары трения колодка–ролик при смазывании маслом АС-8 (1) с различными присадками:**
2 — 0,3% ацетата меди; *3* — 0,4% нафтената меди; *4* — 0,6% $SnCl_4 \times 5H_2O$; *5* — 0,25% $CuCl_2 \cdot 2H_2O$

ных компонентов к минеральным маслам. По эффективности масляные композиции, включающие опытные приработочные присадки, сравнивали с обкаточным маслом ОМ-2, содержащим присадку ксантогенатного типа, маслом АС-8 с 3% ЛЗ-23К и маслом АС-8, принятым за основу.

Результаты испытаний (рис. 1.28) показывают, что процесс приработки пары вал—частичный вкладыш наиболее эффективно происходит при добавке в масло АС-8 хлоридов меди или олова (кривые 4 и 5).

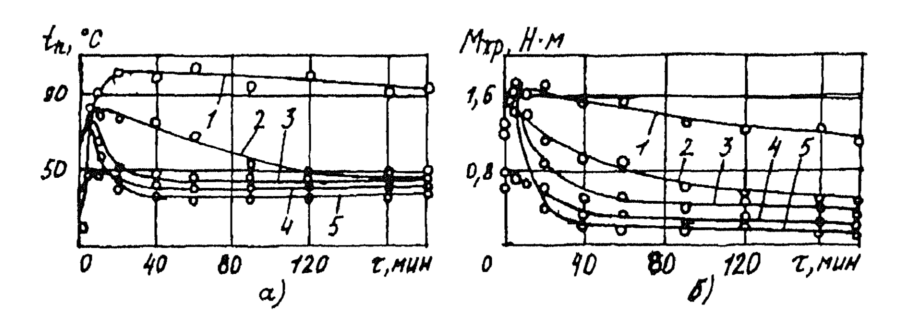


Рис. 1.28. **Графики изменения температуры $t_п$ поверхностных слоев пары трения колодка–ролик (а) и момента трения (б) в процессе приработки на маслах:**
1 — АС-8; *2* — АС-8+3% ЛЗ-23к; *3* — ОМ-2 (обкаточное); *4* — АС-8+0,60% $SnCl_4 \cdot 5H_2O$; *5* — АС-8+0,25% $CuCl_2 \cdot 2H_2O$+1% С — 5А

Стабилизация момента трения и температуры поверхностных слоев наступила уже через 30...40 мин при более низких значениях этих показателей, чем для масла ОМ-2. При этом износ образцов был в 2,8 и 1,6 раза меньше, чем на маслах с присадкой ЛЗ-23К и ОМ-2 соответственно.

Использование масляных композиций, содержащих спиртовые растворы хлоридов меди (ХМС) или олова (ХОС), способствует модифици-

рованию поверхностей трения, имеющих более низкий предел текучести и сопротивление сдвигу, чем основной металл (сталь). Это объясняется образованием на контактирующих поверхностях пленки, содержащей металл вводимой соли.

Исследование поверхности трения стального образца после испытания в смазочной среде, содержащей спиртовый раствор хлорида меди, осуществлялось с использованием фотоэлектронной спектроскопии и электронно-зондового микроанализа. Установлено, что в местах фактического контакта формируется тонкая пленка металла, что является следствием разложения присадки под действием высоких локальных давлений и температурных вспышек в зоне трения.

9.4. Влияние добавок на окисление и вязкость масла

Методом ИК-спектроскопии установлено, что при введении галогенидов металлов в спирт образуются комплексные соединения, растворимые в минеральных маслах.

Низкая стабильность ХМС в масле по сравнению с ХОС авторы объясняют меньшей степенью образования комплекса хлорида меди со спиртом. Очевидно, значительное количество соли меди, введенной в спиртовом растворе в масло, находится во взвешенном состоянии. Поэтому для повышения стабильности масляной композиции с хлоридом меди дополнительно вводилась детергентно-диспергирующая присадка.

Помимо отмеченной функции спиртов (как растворителей) авторы указывают на их важную роль в антиокислительном процессе. Известно, что реакция окисления масел на глубоких стадиях представляет собой сопряженное окисление углеводородов и образовавшихся из них промежуточных соединений, в котором принимают участие перекисные радикалы углеводорода и его продуктов. В ходе окисления меняется среда (накопление полярных продуктов), которая влияет на реакционную способность перекисных радикалов. Например, спирты образуют водородную связь с перекисными радикалами типа $RO_2^{\bullet}$...HOR и снижают активность радикалов $RO_2^{\bullet}$ в реакциях продолжения и обрыва цепей [17, 48].

Ценным в торможении процесса окисления является то, что оксиперекисные радикалы, образующиеся при окислении спирта, обладают восстановительными свойствами [17]. Так, в присутствии солей переходных металлов накопление спиртов при окислении углеводородов приводит на некоторой глубине к интенсивному обрыву цепей.

Торможение совместного окисления углеводорода и спирта в присутствии соли металла переменной валентности объясняется реакциями:

$RO_2^{\bullet} + > CHOH \rightarrow ROOH + > \dot{C}OH$

$> \dot{C}OH + O_2 \rightarrow> C(OH)OO^{\bullet}$

$> C(OH)OO^{\bullet} + Me^{3+} \rightarrow> C = O + H^+ + Me^{2+} + O_2$

$> C(OH)OO^{\bullet} + Me^{2+} \xrightarrow{H^+}> C(OH)OOH + Me^{3+}$

Взаимодействие оксиперекисного радикала с ионами металла в разных валентных состояниях приводит к многократному обрыву цепи.

Антиокислительная стабильность масел с исследуемыми добавками была проверена авторами в барботажных условиях окисления по методу ВТИ (ТУ 38-101295—72). В табл. 2 приведены результаты окисления масел с различным содержанием спиртового раствора хлорида меди.

Таблица 2

Окисление масла М-11 с добавкой ХМС (ВТИ, t = 200°C, τ = 25 ч, v = 3 л/ч)

Содержание ХМС в масле, %	Кислотное число, мг КОН/г		Вязкость при 100°C, сСт		Содержание осадка, нерастворимого в изооктане, %
	до опыта	после опыта	до опыта	после опыта	
М-11 без добавки	Отс.	3,56	10,8	16,1	3,41
1	Отс.	3,39	9,9	14,9	1,76
3	1,00	3,24	8,8	14,6	1,53
5	1,12	3,37	8,5	16,3	1,72
10	1,76	4,91	7,2	15,6	4,32

Увеличение содержания ХМС выше найденного оптимального (3...5%) повышает количество осадка, нерастворимого в изооктане, и увеличивает кислотное число. При снижении содержания ХМС до 1% ухудшаются трибологические свойства масел, а введение спиртового раствора хлорида меди в интервале выбранных оптимальных концентраций оказывает стабилизирующее действие на процесс окисления минерального масла, не снижая его смазочных свойств.

Таким образом, отмеченное положительное влияние спиртовых добавок на процесс окисления углеводородов подтверждает целесообразность выбора спиртов в качестве среды для введения солей металлов в минеральное масло.

9. 5. Роль кислоты в образовании сервовитной пленки

В ряде работ по избирательному переносу подчеркивалась необходимость некоторого минимального количества кислоты способствующей процессу образования сервовитной пленки. Кислота разрыхляет окисную пленку и способствует осаждению металла присадки на стальную поверхность.

При разработке присадок на основе хлоридов меди и олова высокие кислотные числа и коррозионная активность масел были связаны с содержанием соляной кислоты, которая может образовываться при гидролизе солей. Это было обнаружено в связи с изменением величины pH смазочной композиции в зависимости от концентрации введенной в нее соли хлорной меди. Как исследовано В.Г. Бабель, соль в интервале исследуемых концентраций гидролизуется с образованием соляной кислоты, но не полностью.

Наличие активных ионов хлора в смазочном масле на начальной стадии процесса трения способствует быстрому (опережая процессы схватывания) протеканию химических реакций с металлом на поверхности трения с образованием защитных слоев — хлоридов железа, которые уже могут обеспечить нормальный режим трения во фрикционном контакте:

$$FeO + 2HCI \rightarrow FeCI_2 + H_2O$$
$$Fe_2O_3 + 6HCI \rightarrow 2FeCI_3 + 3\ H_2O$$

В дальнейшем при разрушении этой химической пленки медь или олово, содержащиеся в масле в виде ионов, комплексов или сольватированных частиц, в силу электрофоретического движения переносятся на очищенную ювенильную поверхность в зоне контакта, образуя металлоплакирующую сервовитную пленку.

9. 6. Кинетика износа пары трения сталь—сталь

Кинетика износа пары трения сталь—сталь [3] на приработочных маслах с ХМС, ХОС и базовом масле М-11 изучалась на машине трения конструкции А.К. Прокопенко. Испытывались миниатюрные образцы в виде вала с частичным вкладышем. Площадь трения образца составляла 9 мм. Износ определялся с помощью высокочувствительного датчика, что позволило фиксировать не только суммарный износ образцов, но и проследить образование сервовитной пленки (меди и олова). Результаты испытаний представлены на рис. 1.29.

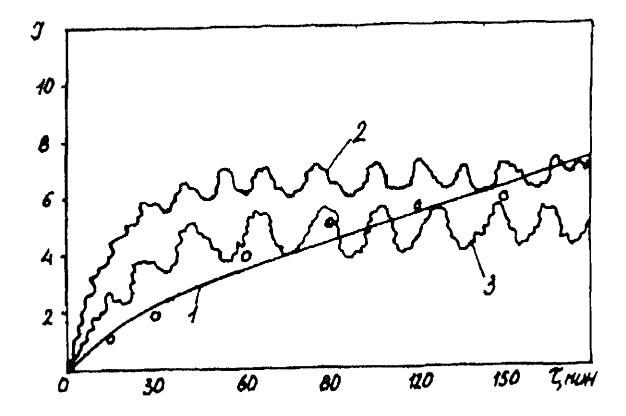


Рис. 1.29. Кинетика износа пары трения сталь—сталь на приработочных маслах с ХМС (3), ХОС (2) и базовом М-11 (1)

В начальный период работы пары трения наблюдалось интенсивное изнашивание контактирующих поверхностей (кривые *3* и *2*). Это объясняется воздействием незначительного количества содержащейся в масле соляной кислоты с образованием на поверхностях трения хлоридов железа и их съема. В дальнейшем интенсивность изнашивания стабилизируется и остается постоянной в течение всего времени испытания. Это характеризует завершение формирования контактной поверхности (т.е. завершение приработки) и по времени соответствует стабилизации момента трения и температуры в поверхностных слоях трущихся деталей.

Размах колебаний кривой износа есть не что иное, как толщина пленки, образуемой на площади фактического контакта, металлом вводимой присадки. Из рисунка видно, что толщина пленки, полученной на масле с ХМС, составляет 0,8...1,2 мкм, а на масле с ХОС — 0,6...0,8 мкм. При этом износ на масле со спиртовым раствором хлорида олова был несколько выше, чем с хлоридом меди.

10. Роль комплексных соединений в избирательном переносе

Для реализации избирательного переноса в смазочные масла добавляют металлоплакирующие присадки, что приводит к снижению интенсивности изнашивания и повышению надежности и долговечности трущихся узлов машин и механизмов. Применяя металлоплакирующие присадки, удается достичь эффект безызносности с автокомпенсацией износа пар трения. Результаты многочисленных исследований, посвященных разработке новых высокоэффективных смазочных масел, пластичных смазок, смазочно-охлаждающих и гидравлических жидкостей, свидетельствует о постоянно растущем интересе к использованию в качестве металлоплакирующих присадок координационных соединений переходных металлов [12].

Механизм работы комплексных соединений в режиме избирательного переноса был изучен школой физико-химиков в Ростове-на-Дону и в первую очередь А.С. Кужаровым [31, 33, 37]; Г.Г. Чигаренко и А.Г. Пономаренко и др. [81, 82]; Г.П. Барчаном [6]; А.Д. Гарновским, Е.С. Бушковой [12] и др. В Санкт-Петербургском Технологическом институте этот вопрос изучала В.Г. Бабель [2, 3].

Работы д.т.н., проф. А.С. Кужарова, д.х.н., проф. А.Д. Гарновского, к.т.н. Г.Г. Чигаренко, к.т.н. А.Г. Пономаренко, д.х.н. проф. Г.П. Барчана

А.С. Кужаров и Н.Ю. Онищук еще в 1985 г. провели наиболее полный обзор свойств и применения металлоплакирующих смазочных материалов, разработанных как у нас, так и за рубежом [35]. Из обзо-

ра следует, что до последнего времени в зарубежной литературе не было научного обоснования механизма формирования смазочного слоя в случае использования металлоорганических присадок (имеется в виду образование в процессе трения комплексных соединений и их распад). По-видимому экспериментальные факты, доказывающие возможность комплексообразования при трении на примере комплексов меди с ароматическими ортооксиазометинами, впервые были опубликованы в 1977 г. [34, 36]. Позднее А.С. Кужаровым, А.Д. Гарновским и др. было показано, что это явление носит достаточно общий характер и может наблюдаться в процессе трения различных металлов и сплавов при смазке их композициями, содержащими в своем составе соединения, способные образовывать комплексы на поверхности трения [12].

Авторы работы [12] показали, что наибольшая эффективность комплексообразующих соединений проявляется в очень узком диапазоне концентраций (0,05...0,2 мас.%), что значительно меньше концентраций 1... 5 мас.%, традиционно применяемых в промышленности противоизносных и противозадирных присадок (заметим, что эти данные совпадают с результатами исследований А.К. Прокопенко и Ю.С. Симакова при их оценке оптимальной концентрации присадки МКФ-18).

А.С. Кужаровым было обнаружено, что при трении меди или медного сплава по стали в режиме ИП наблюдаются хаотические колебания концентрации медьсодержащих продуктов в смазке (рис. 1.30).

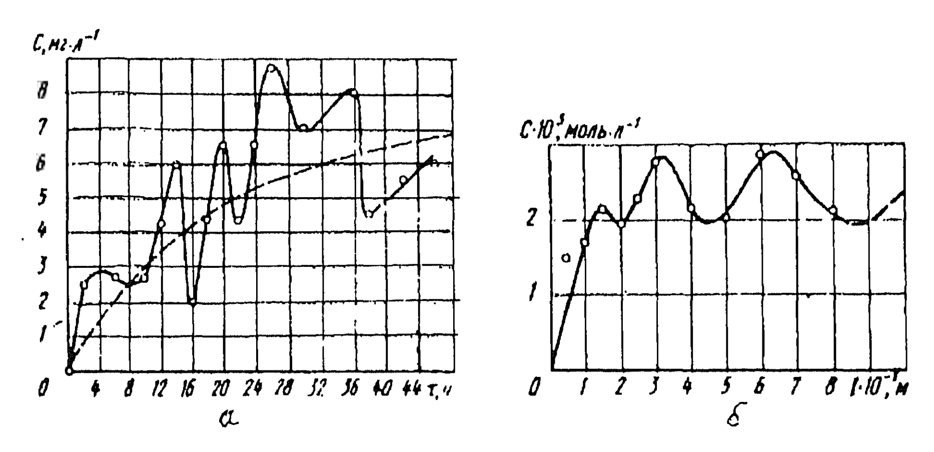


Рис. 1.30. **Колебания концентрации ионов меди (+2) в глицерине (*а*) и салицилиденанилината меди (*б*) при трении в режиме ИП**

Причиной колебаний концентраций присадки являются, по мнению А.С. Кужарова, условия фрикционного контакта, дающие возможность для одновременного протекания трибокоординации и трибовосстановительного распада комплекса с выделением меди на поверхности трения. Колебания концентрации медьсодержащих продуктов при трении в режиме

ИП являются прямым экспериментальным доказательством самоорганизации фрикционной системы за счет трибохимических реакций.

А.С. Кужаров показал, что образуемые медные комплексы имеют объемную или плоскую структуру [33].

Образование в комплексе координационной связи приводит к ослаблению и разрыву связи атома металла в комплексе с атомами металла в решетке. Связь между металлом и комплексом переходит в адсорбционную. Комплекс получает возможность двигаться по поверхности, соединяясь с другими комплексами в островки пленки.

Изложенный механизм образования серфинг-пленок справедлив не только для жидких смазочных материалов, но и для твердых смазочных покрытий на основе избирательного переноса. Так, в работе В.О. Гречко, А.С. Кужарова, А.А. Кутькова и др. [39] рассмотрена аналогичная серфинг-пленка на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ). В качестве антифрикционного покрытия использовалась ткань из волокон ПТФЭ и медной проволоки с выходом на рабочую поверхность в соотношении 10:1 с добавлением легирующих добавок, способных образовывать при трении комплексные соединения. По износостойкости такие покрытия превосходят известные аналоги с полимерной матрицей (вместо меди) более чем в 100 раз [39]. Схематически комплекс приведен на рис.1.31.

Комплекс возникает на основе разложения при трении ПТФЭ и взаимодействия продуктов разложения с медью.

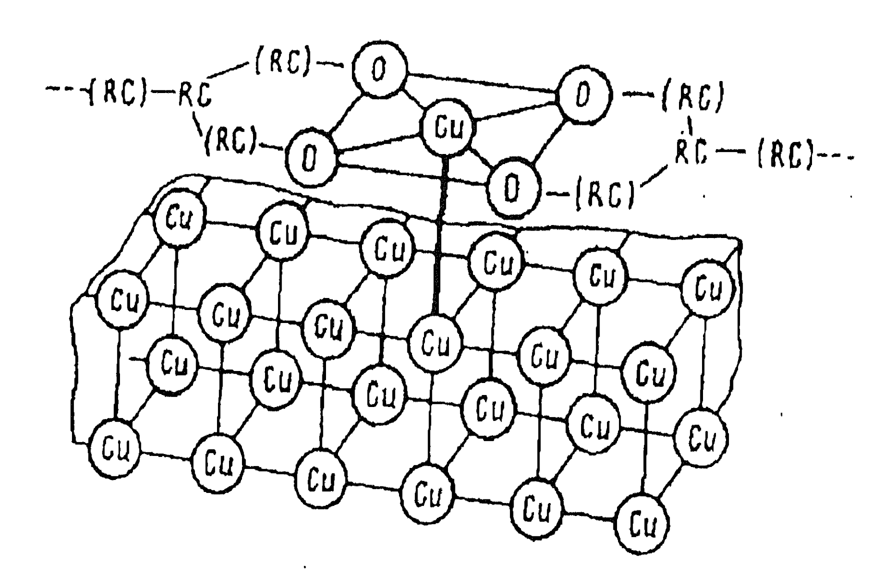


Рис. 1.31. Структура комплекса на пластмассе

В результате изучения смазочного действия металлоплакирующих смазочных материалов (содержащих порошки мягких металлов), а также фрикционных покрытий (латунирование и бронзирование) А.С. Кужаров пришел к следующему выводу. Первичным актом является механическое намазывание и передеформация отдельных металлических частиц, введенных в смазочный материал, а также передеформирование фрикционного покрытия, в результате чего повышается их химическая активность. Это облегчает процесс трибокоординации и приводит к накоплению продуктов трибокоординации в смазочном материале. После накопления координационных соединений в смазке и с начала протекания реакций трибовосстановительного распада происходит формирование сервовитной и серфинг-пленок, которые в дальнейшем обеспечивают процесс ИП.

Авторы работы [81, 82] провели обширное исследование трибохимических реакций, приводящих к формированию смазочного слоя при избирательном переносе.

Триботехнические испытания проводились на машине торцевого трения с подвижными образцами из бронзы БрОФ 6-0,25 и с неподвижными образцами из стали 45 при ступенчатом нагружении с периодическим отбором проб смазочного материала для анализов.

В работе показано, что в начальный период приработки происходит интенсивное растворение контактирующих металлов, о чем свидетельствует резкое увеличение содержания соединений меди и железа, а также интенсивности изнашивания. В дальнейшем содержание соединений меди в смазочной среде уменьшается вследствие обменных процессов на поверхности стального образца, что подтверждается резким увеличением содержания железа в растворе и появлением пленки цвета меди (рис. 1.32, кривая 1).

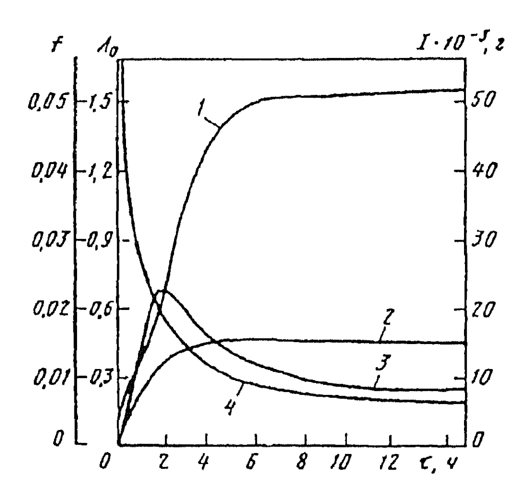


Рис.1.32. **Зависимость концентрации λ_0 соединений меди (3), железа (1), а также износа (I) пары (2) и коэффициента трения (4) от времени испытания**

В дальнейшем происходит стабилизация указанных параметров и на поверхностях образуется защитная пленка органических соединений (серфинг-пленка).

Исследования показали, что комплексообразующие присадки, растворенные в вазелиновом масле (вазелиновое масло не содержит ПАВ), резко улучшают триботехнические характеристики трущейся пары. Наибольшую эффективность проявляют салицилиденалкиламины. Эффективность действия присадки возрастает с увеличением длины алкильного фрагмента. Положительно сказывается замена бензольного кольца нафтеновым в азометиновых соединениях [81].

Практический интерес представляют кинетические исследования выработки присадок. Изменение содержания лиганда и образовавшегося в процессе трения комплекса меди определено спектроскопическим методом (рис. 1.33).

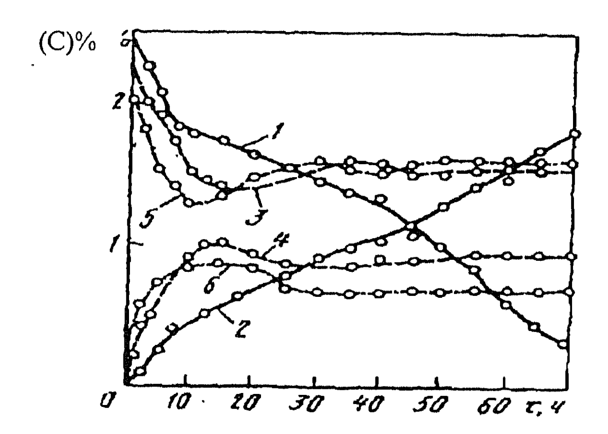


Рис. 1.33. Зависимости содержания (с) лигандов, образующихся при трении координационных соединений от времени испытаний:

1 — салицилиденбутиламин; *2* — его медный комплекс; *3* — салицилидендодециламин; *4* — медный комплекс; *5* — 2-тиазолилазонафтол; *6* — его медный комплекс

В качестве лилгандов были выбраны наиболее характерные — салицилиденбутиламин и салицилидендоцециламин. В процессе трения содержание салицилиденбутиламина монотонно убывает, а содержание комплекса увеличивается. При этом реакция идет в направлении образования комплекса почти до полной выработки лиганда.

Лиганды смазочного материала, входя в связь с возбужденными атомами на поверхности, образуют на ней серфинг-пленки из комплексов, которые воспринимают сдвиг при трении и открываются трением от поверхности металла. Затем пленки из комплексов частично распадаются, освобождая ионы. Последние разряжаются и атомы коагулируют с медной пленкой, а лиганды вновь вступают в соединение.

Такое сложное избирательное поведение атомов и лиганд, как считает А.А. Поляков [53], связано с квантовой структурой веществ, набором энергетических термов и распределением заселенности этих термов. Известно, что свойства атомов в разных состояниях различны, скорости ре-

акций и характер взаимодействия могут различаться на много порядков. Ряд соединений образуются и существуют только в возбужденном состоянии, при переходе в основное состояние они распадаются. Это относится и к возбужденным атомам в кристалле. Комплексные соединения обладают невысокой стабильностью. При повышении температуры они, как правило, распадаются.

Не всякое комплексное соединение способно выполнять функции обмена. Чтобы осуществлять обмен в периодическом режиме, соединение должно находиться частично в диссоциированном виде [53].

11. Эффект безызносности (ИП) как диссипативная структура

11.1. Общие вопросы

В предисловии к сборнику "Синергетика" [72] академик Б.В. Кадомцев пишет: "...этот термин получил достаточно широкое признание и распространение как некоторое общее название для междисциплинарной области, занимающейся изучением появления и развития упорядоченных во времени или в пространстве (или то и другое вместе) процессов или структур. Не только в физике, но и в других науках, изучающих более сложные явления природы, очень часто приходится встречаться с самоорганизацией — появлением и развитием структур в первоначально однородной среде".

Предварительно рассмотрим одно интересное самоорганизующееся явление — образование ячеек Бенара, известное многим специалистам и являющееся классическим примером в области синергетики. Сущность явления состоит в следующем. Если на сковороду налить жидкость (масло) и начинать ее подогревать, то с некоторого момента на поверхности масла будут образовываться геометрические фигуры в виде ячеек — сот (рис. 1.34) [24].

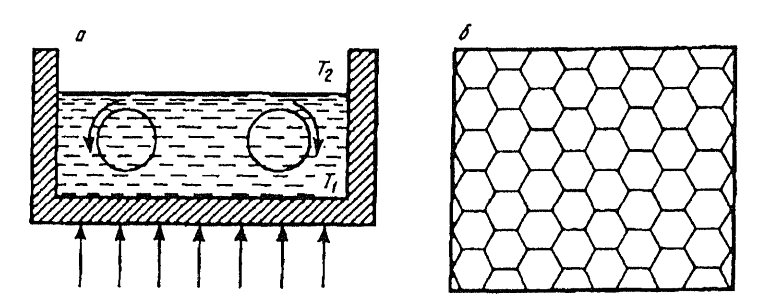


Рис. 1.34. **Образование при нагреве жидкости ячеек Бенара**

Можно сказать, что с некоторого момента нагрева жидкость получила неустойчивость, что привело к изменению ее структуры. Неустойчивость жидкости связана с возникновением вертикального градиента температур порогового (бифуркационного) уровня. До этого уровня сохраня-

ется стационарное состояние, при котором перенос тепла снизу вверх происходил в результате только теплопроводности. Здесь конвекция отсутствовала. При достижении определенной точки (точки бифуркации) происходит самоорганизация диссипативной структуры в виде ячеек Бенара в результате появления нового механизма переноса тепла — конвективных потоков. При этом жидкость спонтанно разделяется на гексагональные ячейки, напоминающие соты, в результате кооперативного движения ее молекул при достижении критического градиента температур.

На рис. 1.35 показана схема образования конвекции и бенаровских ячеек [24, 47].

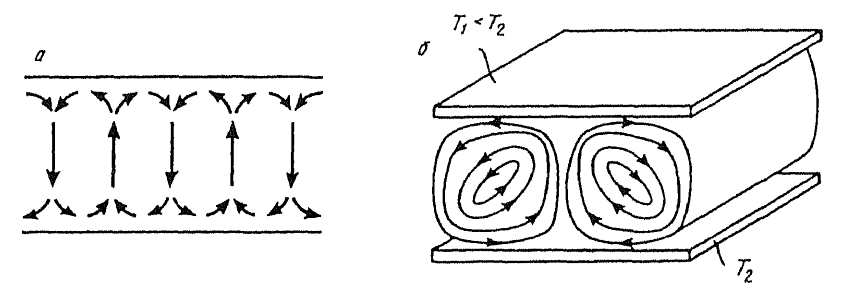


Рис. 1.35. **Два изображения конвективных (бенаровских) ячеек (а, б) [3]**

Процесс конвекции связан с тем, что вследствие теплового расширения жидкость расслаивается — в нижних слоях плотность нагретой жидкости ниже, чем в верхних слоях. В результате верхние слои под действием силы тяжести передвигаются вниз, а нижние, более легкие слои, стремятся переместиться вверх.

Можно отметить, что после порогового повышения температуры возникает новая структура жидкости, с более высоким отводом теплоты от поверхности, что позволяет избежать ее перегрева. Жидкость, в данном случае, после перехода точки бифуркации получила диссипативную структуру. Поток энергии упорядочил систему и увеличил диссипацию тепла.

Этот пример диссипативной структуры приведен с тем, чтобы сравнить его с явлением избирательного переноса. Такое исследование было выполнено А.А. Поляковым.

11.2. Работы А.А. Полякова

А.А. Поляков в последние годы жизни выполнил ряд исследований по механизму ИП с позиций термодинамики неравновесных процессов. Основные статьи по этому вопросу были опубликованы в журналах “Эффект безызносности и триботехнологии” [52, 55, 56].

Сравнение диссипативных структур Бенара и избирательного переноса приведено в табл. 3.

Таблица 3

Содержание сравнения	Эффект Бенара	Эффект ИП
1. В чем состоит эффект перехода к диссипативной структуре	Отдача теплоты во внешнюю среду идет стационарно без возрастания энтропии, что позволяет избежать перегрева	Деформирование при трении происходит без возрастания конфигурационной энтропии, что позволяет избежать разрушения (эффект безызносности)
2. Элемент, образующий диссипативную структуру	Молекула жидкости	Атом металла
3. Определяющий вид энтропии	Тепловая	Конфигурационная (дислокации)
4. Вид негэнтропии	Охлаждение	Разрядка дислокаций при реакции с вакансией или при выходе на поверхность
5. В чем состоит кинетический переход к новому состоянию	В образовании конвективной ячеистой структуры	В переходе от консервативного движения дислокаций к их переползанию
6. Элемент обмена с внешней средой	Теплота	Атом в барьере, мешающем выходу дислокаций на поверхность
7. Способ приспосабливаемости структуры до критического перехода к диссипативной структуре	Ускорение ламинарных потоков жидкости	Образование ячеистой дислокационной структуры

Несмотря на общность схемы, диссипативные структуры в разных условиях и с разными материалами могут значительно различаться. Однако как в том, так и в другом случае наблюдается диссипативная структура, которая возникает не после любого фазового перехода, а только после кинетического. При избирательном переносе кинетический фазовый переход состоит в изменении движения дислокаций от консервативного движения к их переползанию, что наблюдается в известном явлении диффузионно-вакансионного механизма [1].

Неустойчивость при этом сохраняется бесконечно долго; материал при этом не деградирует; он непрерывно деформируется, минуя стадию деструкции.

В предыдущих разделах по теоретическим вопросам избирательного переноса мы неоднократно ссылались на работы А.А. Полякова как в части терминологии, так и в анализе физических процессов этого явления.

Основные работы А.А. Полякова по механизму явления избирательного переноса были опубликованы в журнале "Эффект безызносности и триботехнологии", № 3—4, 1996 г. Поэтому в данном разделе освящены только основные выводы А.А. Полякова, к которым он пришел в результате анализа собственных исследований явления избирательного переноса, работ Л.М. Рыбаковой, Л.И. Куксеновой, Ю.С. Симакова, А.С. Ку-

жарова, В.Г. Бабель, В. П. Алехина и др., а также опубликованных классических работ по термодинамике неравновесных процессов И. Пригожина, Г. Хакена, В. Эбелинга.

В результате исследований А.А. Поляков пришел к следующим выводам:

1. Трение — диссипативный необратимый процесс в поверхностном слое металла. В процессе трения, согласно представлениям неравновесной термодинамики, могут возникать диссипативные структуры. Затрудняющий процесс самоорганизации в поверхностном слое металла при трении и образование диссипативной структуры — близость системы к равновесию, недостаточность ее возбуждения.

Механизмами, которые усиливают возбуждение и могут удалить систему от равновесия, создать преобладание диффузионных потоков при деформировании, может быть избирательное растворение, либо конденсация металла при его осаждении при трении, способствующие образованию неравновесных вакансий.

2. В диссипативном процессе трения кроме обычной энтропии в металле возникает конфигурационная энтропия, выражающаяся в образовании дефектов кристаллической решетки и приводящая к его разрушению. Эта энтропия является объектом исследования и управления.

3. В результате возбуждения металла потоками энергии при трении и деформирования возникают противоборствующие процессы упорядочения и разупрочнения, процессы облегчения и затруднения деформации (подсистемы снижения энтропии или снижения износа и трения). Некоторые подобные процессы могут быть вызваны извне, например, нагревом, закалкой, что позволяет оптимизировать систему в отношении износа или деформирования. В обоих случаях эти процессы происходят вблизи равновесия, когда преобладает консервативное движение дислокаций и обозначается как нулевая синергетика.

Используя специальные методы возбуждения металла при деформировании (избирательное растворение, конденсация) для удаления от равновесия и достижения точки кинетического фазового перехода от консервативного движения дислокаций к преимущественному переползанию, возможно вызвать образование диссипативной структуры. При этом переходе возникают другие факторы снижения энтропии – синергетика первого порядка.

4. Исследование явления избирательного переноса при трении показало, что оно является следствием удаления системы от равновесия путем возбуждения элементов системы, которые приведены в когерентное состояние при самоорганизации подсистем синергетики первого порядка, способствующих возникновению периодического безбарьерного диффузионно-вакансионного механизма переползания дислокаций, сопровождаемого понижением трения и эффектом безызносности.

5. Режим структурной приспосабливаемости, изученный Б.И. Костецким и Л.И. Бершадским (полагая, что это является самоорганизацией), улучшающий антифрикционные характеристики узла трения, находится ближе к равновесию, чем режим избирательного переноса, поскольку

последний возникает после перехода от консервативного движения дислокаций к переползанию, обеспечивающему обратимую пластическую деформацию. Режим структурной приспосабливаемости при граничном трении располагает способами снижения скорости возрастания энтропии – системами оптимизации износа и трения, однако это не относится к синергетике.

6. Режим избирательного переноса использует особые методы возбуждения элементов системы и перехода их в когерентное состояние. Избирательное растворение при трении, ослабляя атомную решетку, как бы создавая подрешетку вакансий, приводит к тому, что движение дислокаций преимущественным видом оказывается переползание.

Избирательное растворение приводит к катодной поляризации и пассивации поверхности, создавая пленку металла без оксидов, насыщенную вакансиями, в которой локализуется трение (так называемую сервовитную пленку).

Избирательное растворение порождает синергетику первого порядка, способствуя образованию систем, ограничивающих рост конфигурационной энтропии "бездефектное" обратимое пластическое деформирование пленки. В результате избирательного растворения образуются комплексные соединения, представляющие собой, как правило, объемную или плоскую молекулу. Они образуют в результате частичной их ассоциации хемосорбированные пленки с повышенными антифрикционными свойствами как в отношении прочности связи (обеспечивающей долговечность службы смазочного материала), так и в отношении уменьшения трения. В соответствии с указанными особыми свойствами пленки получили название серфинг-пленок.

7. В парах трения, не содержащих бронз, например сталь—сталь, в результате распада комплексного соединения, высвобождения иона металла и последующей его разрядки может возникать металлическая пленка, получившая название металлоплакирующей. Пленка образуется из-за конденсации атомов в восстановительных условиях. Это свойство обусловливает создание универсальной смазочной композиции – металлоплакирующей смазки.

8. На начальной стадии трения на поверхности в соответствии с иерархией адсорбционных сил образуется многослойная защита, состоящая из сервовитной пленки, серфинг-пленки, коллоидного слоя и полимерных образований. Подобная система, образующаяся в восстановительных условиях, поглощает адгезионные силы поверхности металла значительнее, чем граничный слой смазочного материала при граничной смазке.

9. Свойство комплексного соединения поддерживать динамическое равновесие между концентрациями комплекса и его составляющих – лигандами и ионом металла — обусловливает регулирующее действие и обмен. Ионы металла, втягиваясь в зазор, разряжаются и коагулируют (конденсируются) с пленкой.

10. Диффузионно-вакансионный механизм, изученный в явлении микропластичности, присутствует и в явлении избирательного переноса.

При насыщении вакансиями и встречном переползании дислокаций в пленке возникает неравновесный безбарьерный диффузионно-вакансионный механизм. Неравновесность его обуславливается тем, что пленка с помощью обратной связи подвергается избирательному растворению и упрочнению, попеременно усиливая и ослабляя потоки вакансий и дислокаций. Безбарьерность связана со способностью атомов, выходящих на поверхность, вступать в химическое соединение с лигандами смазочного материала и при трении десорбироваться. Это явление обмена атомами с внешней средой обозначено как ским-эффект

11. Неравновесный безбарьерный диффузионно-вакансионный механизм может быть косвенно зафиксирован рентгеновским методом как уменьшение параметра решетки a (отражая повышение концентрации вакансий) и как физическое уменьшение ширины рентгеновской линии β (уменьшение концентрации дислокаций), параметры a и β отражают функционирование диффузионно-вакансионного механизма и поэтому могут служить критериями его существования и границ действия. Так, образование интерметаллического соединения в ходе изменения концентрации легирующих элементов, препятствующее возникновению диффузионно-вакансионного механизма, может быть выявлено с помощью этих параметров [68].

12. В координатах интенсивность изнашивания – нагрузка область действия механизма выглядит как область глубокого минимума. Совместное влияние некоторых комплексных соединений в смазочном материале может расширять ее по диапазону нагрузок и по относительной износостойкости, однако это требует эмпирического подбора. Как следует из работ А.А. Кутькова и Г.П. Барчана [40], максимальные температуры, достигнутые в режиме избирательного переноса, составляют 300...350°С.

Подбором лиганд, изменением их концентрации можно регулировать диапазон проявления вакансионно-дислокационного механизма.

13. Главной задачей продолжения исследований избирательного переноса является поиск комплексных соединений, позволяющих обеспечить практическую безызносность узлов трения в требуемых границах нагружений, температур и скоростей.

В заключение А.А. Поляков пишет проблематичную фразу, что пульсация вакансионно-диффузионного механизма напоминает биение сердца, а взаимодействие с подсистемами снижения износа и трения (факторы безызносности) — работу подсистем в живом организме.

Однако, резюмируя в целом, можно заключить, что в зависимости от сочетания и соотношения факторов безызносности при трении может возникнуть: а) состояние поверхностного слоя, отвечающее положению вблизи равновесия, когда несогласованы отдельные факторы, – это трение при граничной смазке, сопровождаемое более или менее медленным разрушением; б) поверхностная пленка с полностью обратимой пластичностью, бесфинально функционирующая во времени, — это трение в режиме избирательного переноса; в) наводороженное состояние поверхностного слоя, приводящее к его разрушению.

Исходя из изложенного, трение следует рассматривать как комплексы регулируемых факторов безызносности, наиболее упорядоченным из которых является диссипативная структура избирательного переноса.

12. Зарубежный опыт применения избирательного переноса в узлах трения (краткий обзор)

Уже длительное время (более 30 лет) за пределами нашей страны для снижения износа деталей машин начали использовать образующуюся в процессе трения между контактируемыми деталями медную пленку. Отмечается, что образование медной пленки во всех случаях приводит к повышению износостойкости узлов трения, а иногда и к проявлению безызносности. Достигаемое повышение износостойкости может быть объяснено осуществлением в зоне трения режима ИП, хотя авторы работ и не всегда используют терминологию, принятую в нашей стране.

Обзор основных направлений использования избирательного переноса для повышения износостойкости контактируемых деталей проведен автором совместно с В.М. Зиновьевым и приводится ниже.

12.1. Избирательный перенос как средство достижения безызносности и повышения надежности контактируемых деталей

В 1970 г. М. Финкин опубликовал статью [85], в которой был сделан анализ факторов, влияющих на изнашивание. Появление статьи было связано с неправильным пониманием новых факторов изнашивания, ставших известными американским конструкторам. Видимо, М. Финкин под новыми факторами имел в виду процесс ИП. В статье наряду с другими факторами анализируется влияние на износ переноса металла с одной поверхности трения на другую. В результате анализа американский ученый приходит к выводу, что условия безызносности могут существовать там, где медь бесконечно переходит с одной поверхности трения на другую, например в механизмах посадки, применяемых на советских самолетах.

Е. Хорнунг провела исследование в области образования реакционных противозадирных смазочных слоев при механическом нагружении твердых тел [86]. В результате исследования было установлено, что слой, полностью исключающий износ, может быть образован в процессе гетерогенного катализа и механохимических реакций, имеющих место в процессе ИП. В исследовании имеются ссылки на советские работы в области ИП.

В высшем техническом училище г. Магдебурга было проведено экспериментальное исследование [45], целью которого было выявить преимущества режима ИП в подшипниках скольжения по сравнению с другими видами трения (сравнительные испытания были проведены в средах глицерина, моторного масла и полиэтиленгликоля). Эксперименты показали, что подшипники скольжения, работающие в режиме ИП, имеют лучшие антифрикционные характеристики, чем подшипники, смазываемые моторным маслом и полиэтиленгликолем.

В том же училище Г. Тум [75] определил влияние ИП на надежность узлов трения машин. В результате проведенного исследования было установлено, что сознательное использование ИП повышает надежность машин и уменьшает число отказов вследствие износа контактируемых деталей трения по сравнению с масляной смазкой.

12.2. Применение избирательного переноса в подшипниках скольжения, работающих в воде

Фирмой "Швицке Металл" (ФРГ) разработан новый самосмазывающийся подшипниковый материал, получивший название пермаглид [87—90, 93]. Подшипники из такого материала применяют в подводном оборудовании, атомных реакторах, турбинах. Подшипник из материала пермаглид показан на рис. 1.36 и 1.37.

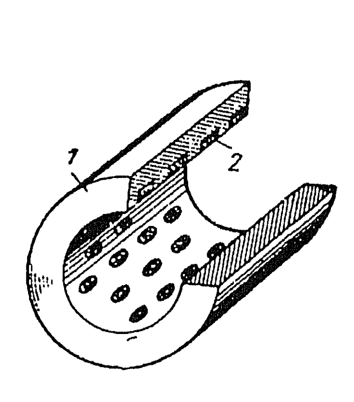


Рис. 1.36. **Подшипник из пермаглида:** *1* — бронзовая основа; *2* — вставки

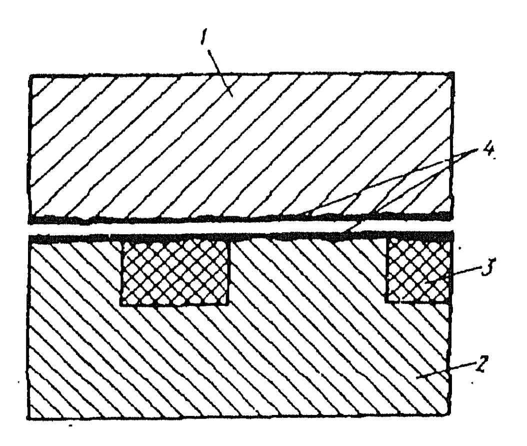


Рис. 1.37. **Самовосстанавливающаяся пленка:** *1* — сталь; *2* — бронзовая основа; *3* — вставки; *4* — пленка

Они предназначены для тяжелых условий работы в среде воды без применения каких-либо жидких или пластичных смазок при нагрузках до 147 МПа и скоростях скольжения 0,001...1,5 м/с. Допускаемая удельная нагрузка снижается с увеличением скорости и при $v = 0{,}2$ м/с составляет 10 МПа. Основой материала служат различные медные сплавы, содержащие олово, свинец, никель, цинк или алюминий. На основе выполнены карманы, которые заполняются сухой смазкой, являющейся смесью различных прессованных порошкообразных материалов. Область применения материала зависит от вставок, в состав которых входят различные компоненты. Основным компонентом вставок при трении материала в воде является графит. В качестве связующего используют пластичные металлы с добавками органических веществ. Отмечается, что размер, форма и количество полостей зависят от конструкции и условий эксплуатации узла трения.

Коррозионная стойкость пермаглида соответствует стойкости медных сплавов в пресной и морской воде. Между металлическим корпусом и материалом твердой вставки не возникает разности электрохимических потенциалов.

Подшипники устойчивы против коррозии и загрязнений, не устойчивы к ударам, хорошо демпфируют вибрации, имеют низкий коэффициент трения (0,1), который сохраняется при пуске и обеспечивает плавность вращения вала при работе узла трения. Отмечается, что в процессе трения образуется тонкая самовосстанавливающаяся и гладкая пленка (рис.1.36), обладающая высокими антифрикционными свойствами. Эта пленка прочно сцепляется с металлической основой. В результате образования пленки соприкосновения контактируемых деталей не происходит, создается надежный разделительный слой. Установлено, что аналогичный материал отечественного производства работает в режиме избирательного переноса [64].

12.3. Применение металлоплакирующих смазок

В США давно появилась металлическая порошковая смесь коллодиум, которая при добавлении в смазку уменьшает коэффициент трения подшипников, восстанавливает их изношенные поверхности. Добавление коллодиума в эмульсию, применяемую при резании металлов, позволяет увеличить скорость резания и уменьшить износ режущего инструмента. В состав смеси входит 70% меди, около 30% свинца, добавки теллура, серебра, олова.

Использование меди для снижения износа двигателей. Роджерс [91] предлагает использовать для снижения износа цилиндров двигателей внутреннего сгорания меднение поршневых чугунных колец. Проведенные сравнительные испытания показали, что применение омеднения поршневых колец вместо чугунных снижает износ цилиндров двигателей по крайней мере в 500 раз.

12.4. Использование медьсодержащих эмульсий при обработке металлов резанием

В работе [92] проведено исследование по снижению износа режущего инструмента при фрезеровании. Для уменьшения износа фрез к смазочно-охлаждающей жидкости добавляли различные присадки. Наиболее эффективной добавкой оказался сульфат меди. Было установлено, что между режущим инструментом и обрабатываемой деталью в процессе резания образуется медная пленка (рис.1.38).

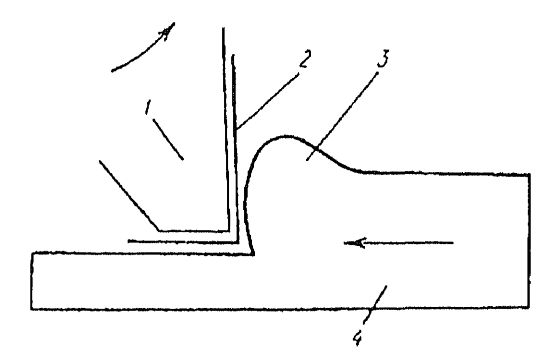


Рис.1.38. **Образование медной пленки в процессе резания металлов:**
1 — фреза; *2* — медная пленка; *3* — стружка; *4* — обрабатываемая деталь

Образовавшаяся медная пленка уменьшает износ фрезы в 2 раза.

12.5. Работы д.т.н., проф. Г. Польцера

В Германии известным специалистом в области трения, износа и смазки в машинах и, в частности, эффекта избирательного переноса является д.т.н., проф. Готлиб Польцер. В опубликованной им совместно с д.т.н., проф. Ф. Майснером и переведенной на русский язык книге "Основы трения и изнашивания" (М. Машиностроение, 1984. 263 с.) глава 17 посвящена эффекту избирательного переноса. В ней, помимо основных положений этого явления, рассмотрены процессы, протекающие при избирательном переносе, условия реализации ИП и использование ИП в технике.

В главе подробно описаны процессы, происходящие при трении пары сталь—бронза в среде глицерина. Указаны действие эффекта Киркиндала и трибоактивация поверхности, образование "квазижидких" граничных пленок и металлоорганических соединений и их распад в процессе трения.

Много внимания уделено условиям реализации избирательного переноса. Рассмотрены такие вопросы, как основные требования к фрикционному сопряжению, возможные варианты реализации. Уделено внимание новому технологическому процессу – финишной антифрикционной безабразивной обработки стальных и чугунных поверхностей трущихся деталей (ФАБО).

Проф. Г. Польцер был научным консультантом докторской диссертации А. Фирковского, который опубликовал в российской печати обширные статьи по роли смазочного материала в процессе избирательного переноса и структурированию трибологической системы в условиях избирательного переноса [77, 78]; был научным руководителем нескольких кандидатских диссертаций по процессу финишной антифрикционной обработки цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Проф. Польцером

и его учениками были разработаны и сконструированы несколько приспособлений и станок-полуавтомат по ФАБО цилиндров автомобильных двигателей, которые вот уже более 10 лет используются на одном из ремонтных предприятий Германии.

Проф. Г.Польцером было проведено несколько научных конференций и семинаров по вопросам избирательного переноса при трении и водородного изнашивания металлов. Ниже отмечены следующие научные результаты проф. Г. Польцера и его учеников [51]:

— отмечаются высокие антифрикционные свойства латунных покрытий, полученных фрикционным способом. Причем эти свойства сохраняются и после того, как покрытие будет полностью изношено. Следствием этого является то, что при латунировании стальная и чугунная поверхности упрочняются на глубину до 80 мкм;

— при высоких нагрузках латунирование одной из стальных поверхностей снижает температуру и коэффициент трения не менее чем в 2 раза;

— оптимальный подбор технологической жидкости при латунировании цилиндров двигателей позволяет сразу получить сервовитную пленку из меди. Это свидетельствует о том, что процесс ФАБО относится к технологиям, реализующим избирательный перенос при трении;

— финишная антифрикционная безабразивная обработка цилиндров двигателя при оптимальных режимах его работы может снизить удельный расход топлива до 3%;

— латунирование гильз цилиндров снижает наводороживание поверхности трения цилиндров.

На основания проведенных обширных лабораторных исследований фрикционного латунирования деталей и стендовых испытаний автомобильных двигателей проф. Г. Польцер пришел к выводу, что ФАБО в парах трения машин и оборудования может заменять дорогостоящие и достаточно безвредные для природной среды способы нанесения покрытий, предназначенные уменьшить трение и износ. К таким покрытиям он относит: фосфатирование, обработку перегретым паром, азотирование, гальванические покрытия из меди и др.

От ФАБО может быть получен следующий экономический эффект:

— снижение износа до 40% в смазанных парах трения из стали и чугуна;

— большая производительность в результате более высокого КПД;

— устранение склонности к схватыванию;

— применение этого способа в процессе приработки;

— экономия энергии вследствие уменьшения трения.

В результате указываются следующие области применения ФАБО:

— пары трения из стали (особенно из высококачественной) и чугуна;

— детали цилиндрической и плоской формы или в форме вала или тела вращения;

— при смазывании пары трения с большинством смазочных материалов, а также при смазке водой, кислотами, щелочами;

— особенно пригоден способ при высокой склонности к схватыванию и небольшом действии абразива в зоне трения;

— в целях предотвращения окисления при трении;

— для повышения предела усталости деталей из стали и чугуна.

По инициативе проф. Г. Польцера был организован Международный научный совет "Избирательный перенос и фрикционные покрытия" и в Москве с 1992 г. стал издаваться Международный журнал "Эффект безызносности и триботехнологии".

12.6. Работы д.т.н., проф. Р. Марчака

В Польше известным специалистом в области трения, износа и смазки в машинах является д.т.н., проф. Ришард Марчак. Проф. Р. Марчак много внимания уделяет исследованиям механизма избирательного переноса и водородного изнашивания металлов. В Польше им было организовано несколько научных семинаров и были изданы труды "Проблемы безызносного трения в машинах" [60]. Под руководством проф. Р. Марчака было подготовлено несколько кандидатских диссертаций по изучению процессов, происходящих при избирательном переносе при трении. Им выполнен также ряд научно-исследовательских работ по международному сотрудничеству между Институтом прецизионной механики (Польша), Институтом машиноведения РАН и Общественным научно-техническим объединением по избирательному переносу и самоорганизующимся системам при трении (Россия) по реализации проекта "Современные методы, обеспечивающие безызносное трение узлов скольжения". Проект направлен на создание и использование в промышленности новых технологий и материалов, обеспечивающих эффект безызносного трения: повышение ресурса машин, снижение расхода смазочных материалов и топлива, сокращение вредных выбросов при эксплуатации двигателей, повышение стойкости металлорежущего инструмента.

При исследовании избирательного переноса Р. Марчак [43] справедливо ставит вопрос о необходимости изучения раздельного влияния роли хемосорбции и взаимодействия активной среды на поверхностный слой металла. При этом он считает необходимым использовать термодинамическое правило противодействия, которое формулируется как принцип Ле Шателье: "Если система, находящаяся в равновесии, подвергается новому воздействию извне, то в системе возникают изменения, которые уменьшают действие этого изменения, приводя к новому равновесному состоянию, по возможности незначительно отличающемуся от исходного состояния".

Этот принцип больше относится к явлениям хемосорбции, что в условиях протекания избирательного переноса приводит к образованию на поверхностях трения дополнительного защитного хемосорбционого слоя из металлорганических соединений.

Активность действия среды на поверхностный слой металла проф. Р. Марчак видит в проявлении эффекта Ребиндера. По этому вопросу он

считает необходимым выяснить влияние вида напряжений и плотности дислокаций на эффективность воздействия окружающей среды. Последующие работы подтвердили тот факт, что в зависимости от вида трения (возвратно-поступательное или вращательное) эффект избирательного проявляется в первом случае более активно.

Для исследования физико-химических процессов, протекающих в зоне фрикционного контакта, проф. Р. Марчаком была сконструирована и изготовлена установка с электронной аппаратурой по определению коэффициента трения и износа (рис. 1.39) [42].

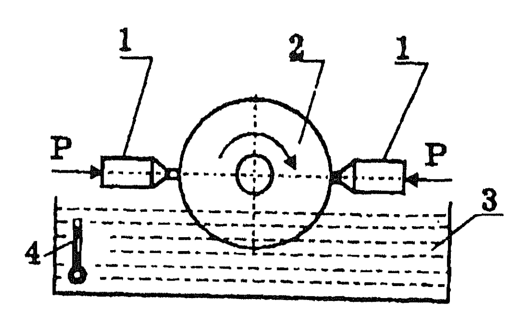


Рис. 1.39. **Схема установки для исследования на машине МТ-1:**
1 — образцы; *2* — контртело; *3* — масляная ванна; *4* — термометр

Р. Марчак совместно с А.С. Кужаровым, А.С. Гузиком и Е.Г. Задощенко провели на данной установке детальное исследование зависимости трибологических свойств в системе латунь—глицерин—сталь и бронза глицерин—сталь от времени при неизменных внешних условиях [20, 42]. Установлено, что переход в режим безызносного трения происходит в течение длительного интервала времени. Сам режим безызносности в том случае, если он реализуется, характеризуется коэффициентом трения менее 0,001 и практически нулевым износом пары трения (рис.1.40).

Анализ полученных данных (рис. 1.40) позволяет выявить особенности перехода исследуемых систем из режима приработки в установившийся режим трения. После приработки систем трения наблюдается падение на порядок интенсивности износа. Непрерывные ее изменения проявляются в колебаниях с небольшой амплитудой вблизи нулевого значения, что связано по мнению авторов с массопереносом в условиях самоорганизации.

Влияние температуры, скорости относительного скольжения, нагрузки на трибологические характеристики исследуемых трущихся материалов при смазке глицерином в дальнейшем подробно были изучены в работе Е.Г. Задошенко [20].

Интересные результаты были получены Р. Марчаком на созданной установке по оценке влияния приработки при смазывании маслом с ак-

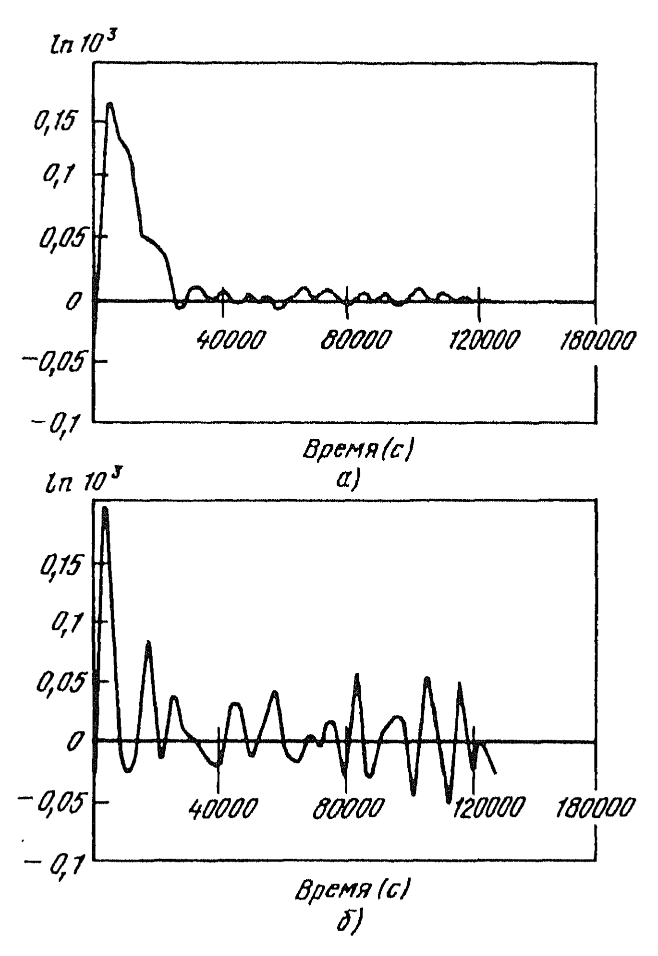


Рис. 1.40. **Зависимость интенсивности износа от времени для систем латунь—глицерин—сталь(а) и бронза—глицерин—сталь (б)**

тивными добавками. Испытанию подвергалась пара трения из стали Ст4: при смазывании чистым маслом и маслом с активными добавками, а также маслом с активными добавками, но после приработки. Результаты испытаний в координатах скорость – нагрузка приведены на рис.1.41.

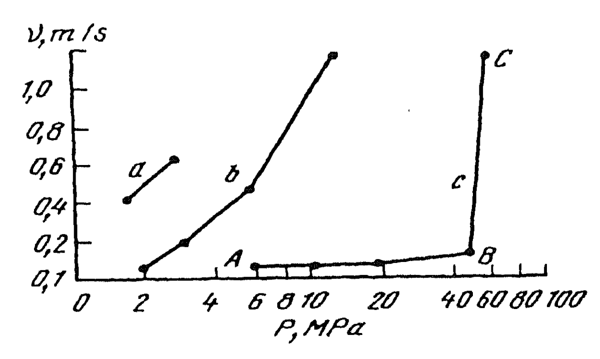


Рис. 1.41. **Трибологические характеристики**

Из приведенных результатов следует вывод, что активная присадка значительно расширяет границы применения трущейся пары сталь—сталь (кривые *а* и *б* в сравнении), а в случае еще предварительной приработки эти границы еще более расширяются (кривая *с*). Анализ приведенных результатов позволяет объяснить причины значительного последействия ФАБО на износостойкость цилиндров двигателей внутреннего сгорания, шарнирно-болтовых сочленений, колес железнодорожного транспорта и др. узлов трения. Высокое качество приработки после ФАБО создает трущемуся сочленению высокую износостойкость в последующей его работе.

Глава 2. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

1. Общие сведения

За последние четверть века использование ИП значительно расширилось. В настоящее время трудно указать область машиностроения, в которой ИП не был бы применен или апробирован.

Опыт применения избирательного переноса в промышленности показывает, что успех перехода на использование принципиально новых смазочных материалов для узлов трения, технологических процессов, новых материалов и конструкций подвижных сочленений достигается только в тех случаях, когда проводилась систематическая научно-исследовательская работа применительно к конкретным узлам трения машин данной отрасли. Попытка расширить внедрение новых методов повышения износостойкости узлов трения простой передачи промышленным предприятиям технических инструкций или даже опытных смазочных материалов не приводила и не может привести к положительным результатам. Знание общих вопросов теории трения и изнашивания в машинах оказывается недостаточным, требуется изучение специальных разделов физикохимии, трибохимии, трибофизики. В каждой отрасти техники, на объектах которой предполагается проведение работ по избирательному переносу, необходимо обучение специалистов в институтах повышения квалификации или в университетах, в которых готовят инженеров по специальности 120600 “Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов” или специальности 071200 “Инженер-триболог”. Укажем еще раз учебные заведения, в которых читаются лекции по применению избирательного переноса в технике: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, Московский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Московский государственный университет сервиса, Пензенский государственный технический университет, Ухтинский государственный индустриальный институт, Омский государственный технический университет.

Опыт организаций, которые уже реализовали преимущества избирательного переноса в узлах трения механизмов, должен быть тщательно изучен, но в каждой отрасли в головных научно-исследовательских институтах необходимо создать лаборатории, которые бы накапливали опыт применения ИП и разрабатывали свою техническую документацию.

В этой главе, как и в предыдущих, излагаются результаты исследований, испытаний и использования на практике эффекта безызносности, выполненных специалистами отдельных отраслей техники.

2. Тяжелонагруженные трущиеся сочленения самолетов

Буксы амортизаторов стоек шасси

Первый опыт применения избирательного переноса в узлах трения самолетов относится к 60-м годам прошлого столетия. В то время на самолетах Ил-28 наблюдался интенсивный износ верхних бронзовых букс основных стоек шасси. Буксы, изготовленные из бронзы БрАЖМц, после 400—600 посадок самолета изнашивались и выходили из строя.

На рис. 2.1 показана бронзовая букса шасси после 600 посадок самолета с заклиненным чугунным кольцом в результате значительной пластической деформации рабочей поверхности буксы.

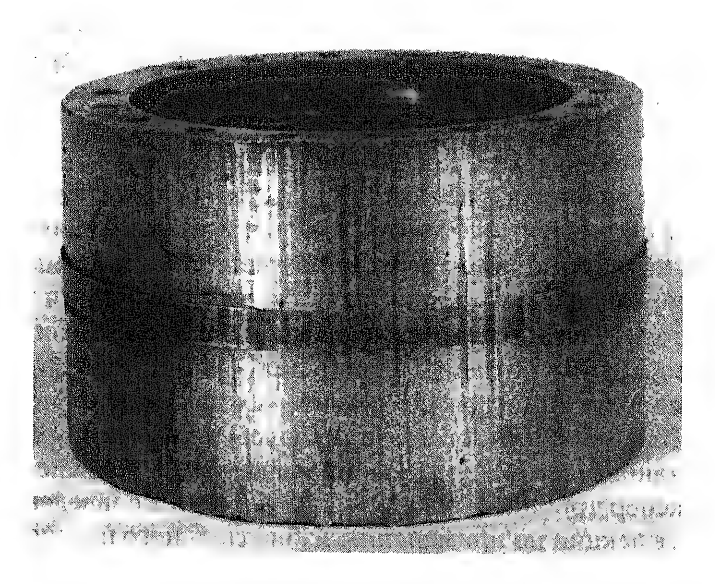


Рис. 2.1. **Верхняя бронзовая букса с заклиненным чугуним кольцом**

С целью выяснения причин повышенного износа бронзовых букс были проведены испытания на износ шести марок бронз в двух средах: спиртоглицериновой смеси и масла МС-20.

Испытания на изнашивание проводилось на машине трения 77 МТ-1 при удельном давлении 12 МПа в течение 20 ч без предварительной приработки. Нижние образцы (пластины) были изготовлены из стали 45, а верхние — из бронзы.

Испытания показали, что бронза БрАЖМц в отличие от других бронз при трении со сталью при смазке спиртоглицериновой смесью обладает следующей особенностью. При трении бронзы БрАЖМц о сталь на поверхности стали образуется слой бронзы, обогащенный медью, который с течением времени испытания утолщается, отдельные кусочки этого слоя отстают от стали и уходят в смазку, а некоторые прилипают на сопряжен-

ный бронзовый образец. Поверхность трения бронзы в процессе изнашивания не покрывалась медью.

При испытании бронз БрОЦС, БрБ-2, БрОФ, БрОСН, БрН описанного явления не происходило. В этом случае поверхность стали покрывалась тонким слоем бронзы, обогащенной атомами меди, толщина которого не увеличивалась с течением времени испытания. Поверхность сопряженной бронзы также обогащалась атомами меди. Величины износов трущихся пар при таких условиях были очень малы, а для некоторых марок бронз износ нельзя было уловить путем взвешивания образцов на аналитических весах.

При испытании бронз в масле МС-20 износ был как стального, так и бронзового образца, при этом величины износов для всех испытываемых бронз были одного порядка.

Числовые данные износов образцов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Марка бронзы	Износ образцов (г) при смазке					
	спирто-глицериновой смесью			маслом МС-20		
	бронзового	стального	пары	бронзового	стального	пары
БрОЦС 6-6-3	0,0012	+0,0008*	0,0004	0,0018	0,0012	0,0030
БрБ-2	0,0003	+0,0001	0,0002	0,0007	0,0008	0,0015
БрОФ 7-0,2	0,0012	+0,0009	0,0003	0,0015	0,0013	0,0028
БрОСН4-3-15	0,0012	+0,0012	0,0000	0,0035	0,0018	0,0053
БрН-4	0,0003	+0,0003	0,0000	0,0010	0,0031	0,0041

* Знак «+» означает, что вес образца после испытания увеличивается вследствие переноса материала.

Из данных, приведенных в таблице 2.1, видно, что все бронзы за исключением бронзы БрАЖМц при смазке спиртоглицериновой смесью реализуют избирательный перенос. Бронза БрАЖМц при смазке этой жидкостью при трении весьма интенсивно растворяется и образующаяся медная пленка не создает условия ее пассивации.

Таким образом, причиной повышенного износа бронзовых букс являлся смазочный материал – спиртоглицериновая смесь, применявшаяся в то время в качестве гидравлической жидкости в стойках шасси. Необходимо было заменить бронзу БрАЖМц на более прочную в коррозионном отношении, например бронзу БрБ-2, или же заменить агрессивную гидравлическую жидкость — спиртоглицериновую смесь по отношению к бронзе БрАЖМц на менее агрессивную жидкость АМГ-10.

После проведения длительных эксплуатационных испытаний стоек шасси оба пути оказались перспективными. В итоге было принято решение заменить спиртоглицериновую смесь на жидкость АМГ-10, учитывая и другие, помимо износостойкости деталей, качества этой жидкости.

Применение гидравлической жидкости АМГ-10 в стойках шасси самолетов типов Ил и Ту привело к полной безызносности сопряжения бронзовых букс и сопряженных с ними стальных стоек шасси. Так, например, буксы стоек шасси самолета Ту-104 за время эксплуатации самолета в течение двух десятков лет вообще не заменялись. При эксплуатации рабочая поверхность бронзовых букс покрывалась очень тонкой, медного цвета, пленкой с шероховатостью 14 класса.

2.1. Шарнирно-болтовые сочленения шасси, планера и управления

При исследовании технического состояния самолетов было установлено, что при трении пары сталь – бронза и сталь хромированная — бронза и смазке ЦИАТИМ-201 в шарнирно-болтовых соединениях проявлялся эффект избирательного переноса. Такие соединения работали надежно и мало изнашивались. В открытых шарнирах после их длительной эксплуатации в зазорах обнаруживалось содержание большого количества пыли, что, естественно, не могло не сказаться на снижении долговечности соединения. Пыль часто представляет собой мельчайшие частицы кварца, которые царапают как стальную, так и бронзовую поверхности, многократно деформируют участки контакта, охрупчивают их и разрушают поверхность детали.

В открытые узлы шасси и планера самолетов попадает влага, которая способствует окислению поверхностей и нарушает условие безокислительного трения, характерное для ИП.

Узлы трения шасси испытывают ударную нагрузку, что приводит при многократном воздействии к макроскопическим деформациям бронзовых деталей и увеличению зазоров. Поэтому ряд узлов шасси и планера самолета достаточно быстро изнашиваются. Явление избирательного переноса не могло скомпенсировать разрушающее действие указанных выше факторов, вызванных своеобразными условиями работы узлов трения шасси самолетов. Но можно, однако, утверждать, что многие детали закрытых узлов шасси, испытывая высокие удельные нагрузки, практически не имеют износа, что обязано только лишь явлению избирательного переноса.

Большую роль в надежности и долговечности узлов трения играют и эксплуатационные факторы, связанные, например, с регулярностью смазывания узлов трения и др. В качестве примера приведены данные износов бронзовых втулок подвески основных стоек шасси четырех транспортных самолетов (табл. 2.2).

В таблице дан наибольший размер втулок в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Номинальный размер посадочного диаметра новой втулки — 96,00–96,07 мм. Зазор в сочленении – 0,15 мм.

Таблица 2.2

Условные обозначения самолетов	Данные износа втулок			
	А	Б	В	Г
Число часов налета самолета	1862	2049	1587	1480
Число посадок	1509	1273	1147	1473
Диаметр правой втулки правой стойки	96,03–96,06	96,11–96,15	96,05–96,10	96,08–96,12
Диаметр левой втулки правой стойки	96,02–96,07	96,08–96,14	96,03–96,015	96,00–96,09
Диаметр правой втулки левой стойки	96,08–96,05	96,07–96,22	96,06–96,10	96,05–96,11
Диаметр левой втулки левой стойки	96,02–96,07	96,05–96,11	96,00–96,12	96,03–96,05

Из таблицы следует, что из 4 самолетов только на одном (А) втулки не вышли из номинального размера за период эксплуатации при большом числе посадок. На рис. 2.2 показан стальной болт, работавший в паре с бронзовой втулкой. Стрелкой показана перенесенная на поверхность болта бронза, обогащенная медью. Зазор в этой паре трения не вышел из номинального. Условия эксплуатации самолетов были самыми различными: от южных пыльных до северных заснеженных аэродромов.

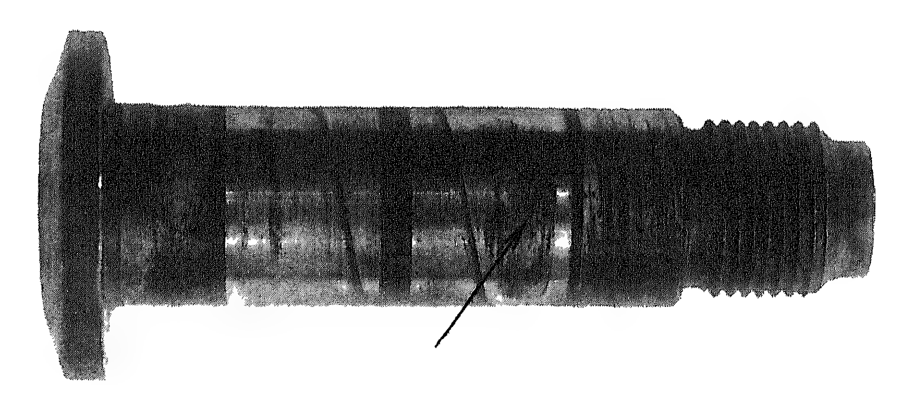


Рис. 2.2. **Стальной болт шасси самолета с налетом меди на рабочей поверхности** (показано стрелкой)

Проявление эффекта избирательного переноса в узлах трения шасси самолетов наблюдалось в парах трения сталь—бронза или сталь хромированная—бронза.

С целью реализации ИП в парах трения сталь—сталь было предложено ввести в смазочный материал мелких частиц меди. Первые опыты, показавшие положительные результаты, были проведены при работе пары трения сталь—сталь и смазке глицерином и медным порошком [13].

Работа к.т.н. В.Г. Шимановского и к.т.н. М.Н. Шепера

Авторы для реализации ИП и повышения надежности работы шарнирно-болтовых соединений шасси и планера самолетов использовали смазку ЦИАТИМ-201 с порошками бронзы или свинца [14, 70—72]. Эксперименты со смазками, включающими наполнители в виде порошков металлов, показали, что при трении происходит плакирование стальных поверхностей. Этот процесс наблюдался визуально при осмотре поверхностей образцов после испытаний на машинах трения и подтвердился локальным спектральным анализом. Поэтому такие смазки были названы металлоплакирующими [14, 73].

Дальнейшие исследования показали, что такие металлы как медь, олово и свинец значительно увеличивают противозадирную стойкость смазок. Порошок алюминия снижает противозадирную стойкость смазки в силу того, что при работе он интенсивно окисляется и его окислы, являясь весьма твердыми, царапают стальную поверхность.

Лабораторные испытания пары трения сталь—бронза при работе на смазке ЦИАТИМ-201 с добавлением порошков олова или свинца, проведенные на машине трения МИ-1, показали, что коэффициенты трения ниже, чем при использовании этой же смазки без наполнителей [71].

Испытания образцов из стали 30ХГСНА с твердостью HRC 45-47 по бронзе БрАЖМц, проведенные на машине трения МИ-1 со смазкой ЦИАТИМ-201, содержащей порошки мягких металлов, при постоянной скорости скольжения 0,4 м/с и удельной нагрузке 16 МПа показали, что введение порошков металлов снижает интенсивность изнашивания в период приработки и в период установившегося износа (рис. 2.3).

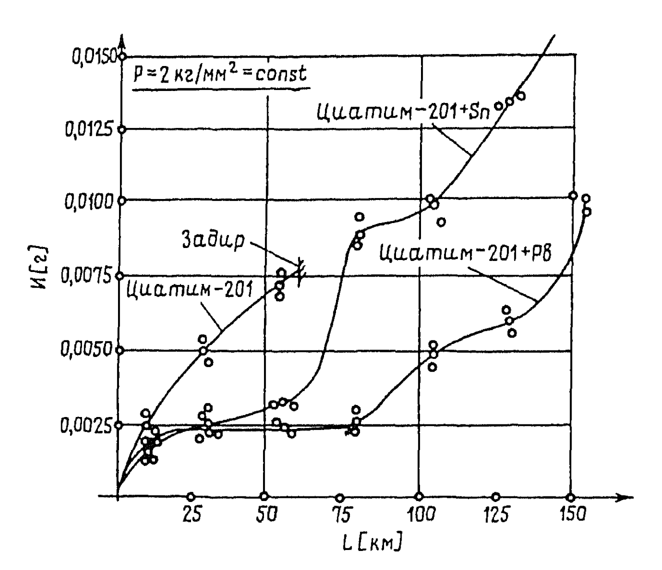


Рис. 2.3. **Зависимость интенсивности износа при увеличении пути трения. Пара трения сталь 30ХГСНА по БрАЖМц**

Затем авторы провели испытания пары трения сталь—бронза на натурном стенде по испытанию шарниров (рис.2.4).

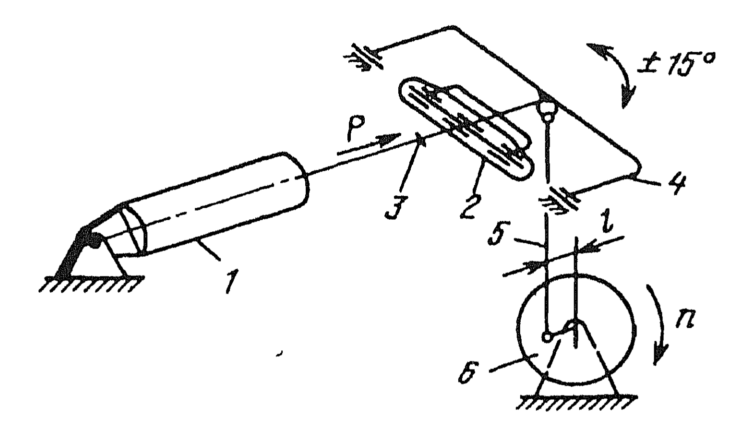


Рис. 2.4. **Схема стенда для испытаний шарниров шасси:**
1 — загрузочный шарнир; *2* — испытуемый шарнир; *3* — поворотная муфта; *4*, *5*, *6* — *кривошип*

Испытывались подшипники из бронзы БрАЖМц в паре с валами из стали 30ХГСНА с металлоплакирующей смазкой и обычной смазкой ЦИАТИМ-201. Результаты испытаний (рис. 2.5) показали высокую несущую способность металлоплакирующей смазки за счет образования на поверхности трения плакирующего слоя.

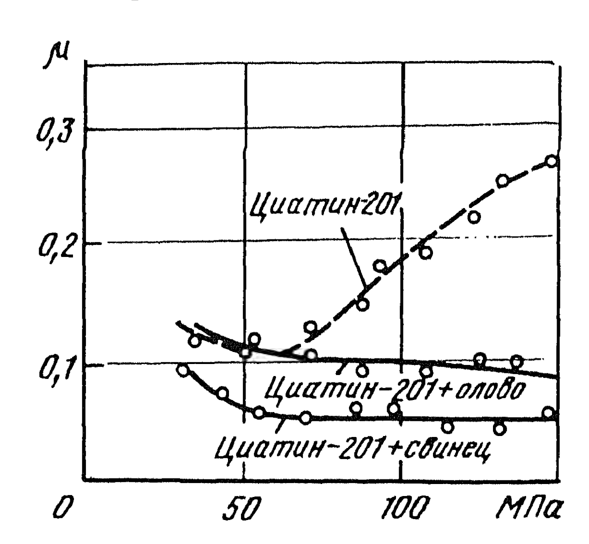


Рис. 2.5. **Изменение коэффициента трения в зависимости от удельной нагрузки (МПа) и от применяемой смазки (испытания на натурном стенде)**

Дальнейшие исследования по оценке эффективности металлоплакирующих смазок проводились непосредственно в эксплуатационных условиях. Для этого производилось измерение люфта в соединениях шасси 16 самолетов, в которые вводилась обычная и металлоплакирующая смазки.

Длительные эксплуатационные испытания подтвердили результаты лабораторных исследований.

Обработка статистических данных показала, что применение металлоплакирующей смазки ЦИАТИМ-201 + 10% свинца дает возможность увеличить ресурс бронзовых подшипников примерно в 3 раза [71].

Металлоплакирующая смазка ЦИАТИМ-201 + 10% порошка свинца под названием "Свинцоль 0,1" вот уже более 25 лет применяется на некоторых типах военных самолетов России.

Работа С.И. Дякина

Исследования по применению ИП в тяжелонагруженных шарнирных соединениях самолетов проводились С.И. Дякиным в ОКБ им. П.О. Сухого [23, 24]. Им совместно с С.И. Крахмалевым и др. была разработана металлоплакирующая смазка "Атланта", реализующая режим избирательного переноса при трении. С.И. Дякин разработал метод оценки несущей способности пластичных смазочных материалов применительно к тяжело нагруженным шарнирным соединениям самолетов; изучил закономерности изнашивания шарниров, их несущую способность, коэффициенты трения и износостойкость пар трения при использовании металлоплакирующих смазочных материалов, реализующих избирательный перенос; исследовал влияние гранулометрического состава присадок на прокачиваемость смазочных материалов; установил периодичность смены смазочного материала в узлах трения [23—25].

В работах С.И. Дякина показаны преимущества металлоплакирующих смазочных материалов перед обычными в условиях масляного "голодания". При однократном смазывании через некоторое время шарнир шасси самолета начинает испытывать недостаток смазочного материала – повышается коэффициент трения, температура и интенсивность изнашивания. Возникает необходимость в новом смазывании. На рис.2.6 показана зависимость коэффициента трения от времени работы шарнира. Каждый раз при новом смазывании шарнира коэффициент трения падал, а затем по мере наработки вновь возрастал.

При реализации ИП время работы узла трения до повторного смазывания увеличивается в 3...4 раза. Сервовитная пленка может длительно

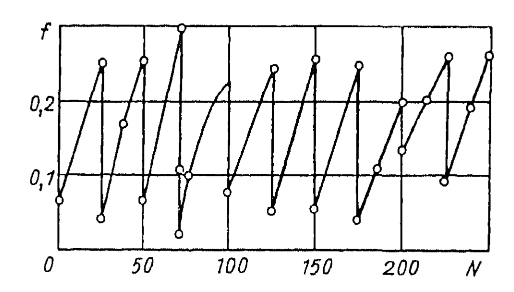


Рис. 2.6. **Зависимость коэффициента трения от числа применений шарнира при однократном смазывании ЦИАТИМ-201(по результатам модельных испытаний)**

работать без дополнительного питания поверхностей смазочным материалом.

На рис. 2.7 приведена зависимость коэффициента трения тяжелонагруженного шарнира от числа применений при однократном смазывании тремя видами смазочного материала.

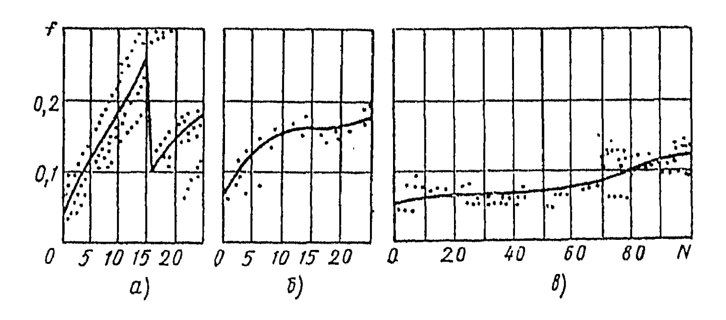


Рис. 2.7. **Зависимость коэффициента трения от числа применений шарнира при однократном смазывании:**
а – ЦИАТИМ-201; *б* – Свинцоль 01; *в* – ВНИИ НП-254

При испытании были приняты пороговые значения коэффициента трения (f = 0,22) и температура (q = 50°С). При смазывании ЦИАТИМ-201 пороговый коэффициент трения был уже после 13...17 применений шарнира, а при использовании металлоплакирующего смазочного материала – после 100 применений.

Смазочный материал "Свинцоль–01" по числу применений занимает промежуточное положение.

Увеличение промежутка времени между пополнениями узла трения смазочным материалом имеет большое значение для машин с многочисленными точками смазывания (экономия смазочных материалов и рабочей силы). Так, в ряде случаев на самолетах смазочно-регулировочные работы занимают до 50% времени на проведение регламентов. То же относится и к автомобилям, металлорежущим станкам, оборудованию текстильной и легкой промышленности.

В целом технический эффект от применения металлоплакирующих смазочных материалов в тяжелонагруженных узлах самолета, по данным С.И. Дякина, образуется из следующих элементов: увеличения нагрузки в узлах трения в 1,5...2 раза (до 100—120 МПа); снижения массы бронзовых подшипников на 25%; повышения износостойкости деталей в 2 раза; увеличения периода между смазываниями не менее чем в 3 раза; снижения общих затрат на эксплуатацию в 2...3 раза.

Минимальный экономический эффект от применения металлоплакирующего смазочного материала в течение 1 года эксплуатации самолета составляет 32 рубля на 1 кг смазочного материала (в ценах на 1985 г.).

Работа д.т.н., проф. В.Н. Лозовского

В процессе эксплуатации самолетов типа Ту были случаи задиров стальных поверхностей шарнирно-болтовых сочленений шасси и планера, а также рабочих поверхностей цилиндров управления замками щитков закрылков. С целью устранения задиров В.Н. Лозовским была разработана технология фрикционного латунирования стальных поверхностей указанных трущихся деталей [40].

Прежде чем применить процесс фрикционного латунирования в авиационных подразделениях, необходимо было провести ряд исследований по оценке эффективности этого метода: его влияния на задиростойкость стальных деталей, на усталостную прочность, коррозионную стойкость, шероховатость стальной поверхности и др. Все эти вопросы были подробно изучены [12, 40], и лишь после этого фрикционное латунирование было применено в авиаремонтных предприятиях [52].

Использование фрикционного латунирования в шарнирно-болтовых сочленениях полностью исключило задиры стальных поверхностей в процессе эксплуатации и повысило срок их службы.

2.2. Силовые цилиндры гидравлической системы

Наименее износостойкими местами цилиндров является лабиринтное уплотнение и место контакта крышки цилиндра с торцом штока. Вследствие образования задиров на сопряженных поясков штока и цилиндра происходит их интенсивный износ и недопустимо большое увеличение внутренних утечек рабочей жидкости через лабиринтное уплотнение.

В то же время из-за ударного характера соприкосновения торца штока с крышкой цилиндра на поверхности последней происходит оттеснение слоя кадмия (антикоррозионного покрытия), оголение стальной поверхности и схватывание материала штока и цилиндра, что приводит к вырыву материала с поверхности крышки. Образующиеся при этом продукты износа в виде стальных частиц засоряют гидравлическую систему, снижая надежность работы гидравлических агрегатов.

Фрикционное латунирование поверхностей лабиринтных поясков и торца штока улучшает прирабатываемость элементов лабиринтного уплотнения и существенно уменьшает утечки, а также полностью устраняет разрушение поверхности крышки и цилиндра [12].

Фрикционное латунирование в авиационной технике можно использовать также для предохранения от схватывания поверхностей деталей, устанавливаемых с натягом и периодически демонтируемых. Позднее процесс “Фрикционного латунирования” был переименован в “Финишную антифрикционную безабразивную обработку” – ФАБО процесс.

Детали топливной аппаратуры

Работа к.т.н. Г.И. Румянцева

Основными требованиями, предъявляемыми к золотниковым и плунжерным парам топливной аппаратуры, является высокая стабильность малых по величине сил трения между деталями и хорошая герметичность.

В этом разделе описываются исследования эффекта ИП для повышения износостойкости деталей топливной аппаратуры [65]. Для этого был применен метод ФАБО золотников плунжерных пар и сфер плунжеров.

Для производства ФАБО было разработано приспособление и разработан технологический процесс нанесения покрытия на прецизионные детали топливной аппаратуры (рис.2.8).

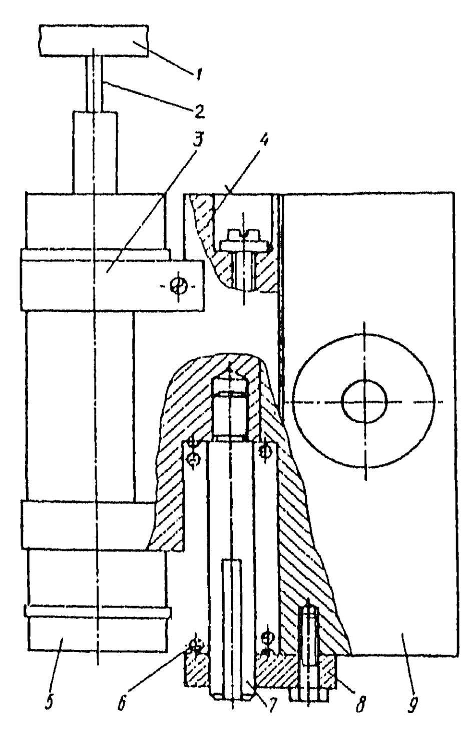


Рис. 2.8. **Схема фрикционного латунирования:**
1 – обрабатываемая деталь; *2* – пруток; *3* – хомут; *4* – подвижная часть приспособления; *5* – электродвигатель; *6* – пружина; *7* – измерительный штырь; *8* – планка; *9* – корпус

Нанесение покрытия на поверхности деталей в виде тел вращения производят на обычном токарно-винторезном станке. Детали в виде цилиндра устанавливают между центрами, один из которых закреплен в патроне и при работе станка приводит во вращение деталь, а второй вращающийся центр закреплен на задней бабке станка.

Приспособление устанавливают на суппорт токарного станка с помощью отверстия в неподвижном корпусе и крепят стопорным винтом.

Пруток из медного сплава зажимают в державке электродвигателя, который сообщает ему вращательное движение.

Электродвигатель прикреплен к подвижной части приспособления при помощи хомутов. Давление прутка на деталь регулируется натягом поперечного суппорта при помощи индикаторного приспособления с пружиной, предварительно тарированной. Фрикционную обработку производят при скорости скольжения прутка 0,1...0,2 м/с, удельном давлении 50...70 МПа, продольной подаче 0,1...0,2 мм/об, частоте вращения прутка 200...250 об/мин, диаметре прутка 4...6 мм, число проходов 2...3.

Для активации процесса растворения химически стойких окислов, образующихся на поверхности детали, в процессе фрикционной обработки была применена технологическая среда на основе глицерина и соляной кислоты.

При латунировании стальной детали толщина покрытия составляла 3...5 мкм, а при бронзировании 1...2 мкм.

Технологические испытания в течение 130 ч обработанных ФАБО золотниковых пар проводились на серийном насосе типа НР. Опыт работы с такими насосами показал, что наибольшее число случаев износа рабочих поверхностей приходится на золотник обратной связи, сферы плунжера и дифференциального клапана. На плунжеры, золотник обратной связи и дифференциальный клапан были нанесены покрытия из латуни Л62.

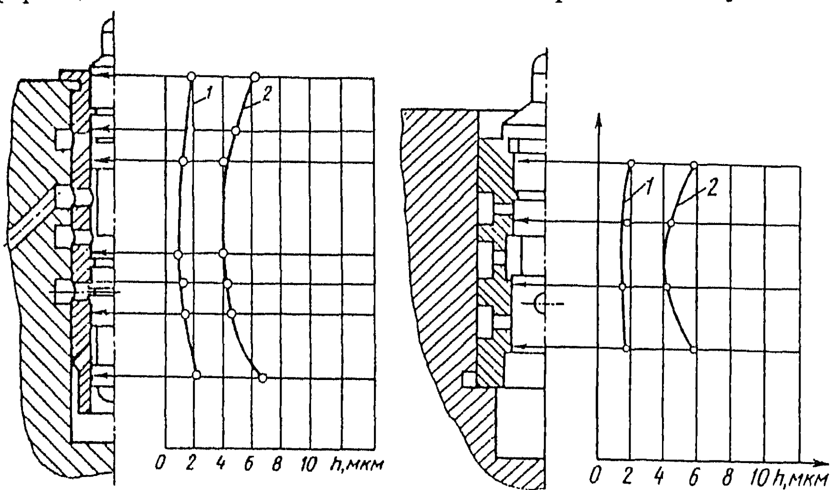


Рис. 2.9. **Кривые диаметральных износов h поверхностей серийного (2) и экспериментального (1) золотников ограничителя низкого давления**

Рис. 2.10. **Кривые диаметральных износов h поверхностей серийного (2) и экспериментального (1) золотников дифференциального клапана**

В результате испытаний в углеводородном топливе были сняты характеристики насоса. После разборки и обмера деталей в соответствии с картами микрометража было установлено, что все параметры насоса соответствуют нормам технических условий, износостойкость экспериментальных деталей в 2...3 раза выше, чем серийных (рис. 2.9, 2.10).

Сферические поверхности плунжеров и сопряженная с ним наклонная шайба повреждений не имела, класс шероховатости ее рабочей поверхности повысился с 10-го до 12-го (рис. 2.11).

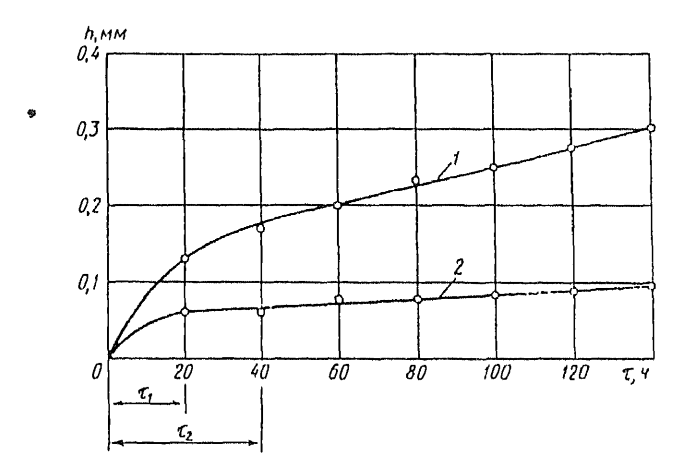


Рис. 2.11. Зависимость износа h сфер серийного (1) и экспериментального (2) плунжеров от времени t; t_1 и t_2 – время приработки сфер

Проведенные испытания показали, что метод ФАБО деталей топливной аппаратуры позволяет значительно снизить износ трущихся деталей и устранить задиры поверхностей.

2.3. Применение металлоплакирующих материалов

Работы к.т.н. В.М. Кремешного, к.т.н. А.В. Белякова, к.т.н. А.В. Тепляшина

В целях реализации эффекта безызносности в узлах трения авиационной техники авторы предложили использование комплексного способа, включающего предварительное нанесение фрикционно-химическим методом износостойкого покрытия поверхности и применение в эксплуатации металлоплакирующего смазочного материала (МПСМ) [36–38].

Ранее был разработан металлоплакирующий смазочный материал Метапол ТУ205 ЛР 0142-88, который показал хорошие эксплуатационные результаты в промышленности и на транспорте [37]. В смазочный материал Метапол входит полимерный порошок и порошки из меди и свинца. Основой может быть смазка ЦИАТИМ-201, литол или солидол, а также поверхностно-активные вещества. Полимерный порошок, так же как и порошок меди, в процессе работы размазывается по поверхности трущейся детали. В результате создается защитная металлополимерная пленка.

Нанесение покрытия необходимо для того, чтобы в начальный период работы узла трения, когда эффект плакирования еще не реализован, предотвратить схватывание трущихся поверхностей на пятнах фактического контакта. В дальнейшем в местах с максимальным трибовоздействием, после изнашивания покрытия, происходит осаждение из металлоплакирующего смазочного материала защитной металлополимерной пленки.

Нанесение металлополимерного покрытия производится путем натирания поверхности стержнем, изготовленного прессованием и спека-

нием порошков антифрикционных материалов и полимера. Особенностью этого процесса является создание условий для интенсивной диффузии металлов покрытия в стальную деталь на большую глубину (12...13 мкм) с аномальным высоким коэффициентом диффузии порядка $Д=I\cdot10^{-12}$ м^2/с [37].

Авторы считают, что наиболее эффективным способом повышения износостойкости трущихся деталей является совместное использование фрикционного покрытия и металлоплакирующего смазочного материала. Лабораторные и стендовые испытания такого способа на машинах трения, имитирующих работу цилиндрических и сферических шарнирно-болтовых соединений, позволяют обеспечить надежную работу узла трения вплоть до достижения параметра PV = 0,56 МПа (м/с), а по сравнению с известными способами снижает износ в 3...15 раз, коэффициент трения в 2...6 раза, температуру на 20...80% и увеличивает путь трения до достижения предельного значения коэффициента трения, равного 0,22, в 1,6... 2 раза [38].

По разработанному способу составлена производственная инструкция ВИАМ Пи 1.2.450-91. Способ реализован на одном из типов тяжелых самолетов [37].

3. Машины и механизмы морского флота

3.1. Замена смазки маслом на смазку водой в подшипниках скольжения

Использование морской воды в качестве смазочной среды для узлов трения многих машин и механизмов морского флота является перспективным и экономически выгодным. В парах металл — полимер при сравнительно низких контактных давлениях смазка водой применяется давно. Водой смазываются, например, подшипники судовых гребных валов, подшипники гидротурбин и т.п.

Для традиционной пары сталь — медный сплав вода также может служить смазкой. Здесь условия существования внешнего трения реализуются благодаря образованию на контактирующих поверхностях пленки, состоящей из окислов металлов и адсорбированных молекул воды. Однако при нагрузках, превышающих 5,0...7,5 МПа, окисная пленка разрушается быстрее, нежели воспроизводится, износ становится катастрофическим, а пара трения неработоспособной. Возбуждение избирательного переноса делает эту пару высокоизносостойкой при больших давлениях на контакте, вплоть до 100 МПа.

Благодаря электролитическим свойствам воды, в частности морской, в паре трения бронза—сталь происходит избирательное растворение легирующих элементов бронзы и обогащение медью ее поверхности. Поверхностная активность воды обуславливает адсорбционное пластифицирование наружного слоя. Введение же в зону трения веществ, присутствие которых способствует восстановлению окислов меди, — необходимые и достаточные предпосылки для существования избирательного переноса.

Работа д.т.н. М. Б. Рубина и к.т.н. В. М. Зиновьева

Авторы провели исследовательские работы по созданию тяжелонагруженных подшипников скольжения, способных работать на морской воде. Для введения нужных веществ в зону контакта металлов эффективным оказалось использование метода ротапринта [5, 61]. Подшипник, который смазывается по методу ротапринта, показан на рис. 2.12.

Смазывающие элементы могут быть изготовлены из материала на полимерной основе с соответствующими наполнителями.

Сервовитный слой, который образуется при ИП и обеспечивает большую нагрузочную способность и высокую износостойкость пары трения, в рассматриваемом случае, кроме пластичной меди, содержит полимер и продукты его деструкции, а также наполнители [62].

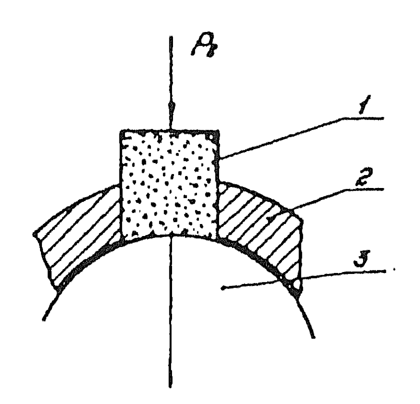


Рис. 2.12. **Подшипник, смазываемый по методу ротапринта:**
1 – неметаллический брикет; 2 – металлическая втулка; 3 – вал

Для ясности рассмотрим некоторые свойства этого слоя, которые проявляются в закономерностях износа трущихся материалов при смазке водой. От количества материала смазывающих элементов, попадающих в зону фрикционного контакта и являющихся реагентами в протекании там физико-химических процессов, существенно зависят свойства сервовитного слоя и, как следствие, интенсивность износа пары трения. Метод ротапринта позволяет осуществлять дозирование веществ, которые направляются в зону трения [63].

Если изменять давление *Рв* на смазывающий элемент, будет меняться интенсивность его износа, то есть количество продуктов износа, подаваемых в зону трения металлов в единицу времени. На рис. 2.13 приведены графики изменения интенсивности износа самосмазывающих элементов и металлических участков подшипника с увеличением давления *Рв* при постоянном давлении на металл (*Рм* = = 10 МПа). С увеличением нагрузки на смазывающие элементы они изнашиваются быстрее, следовательно, возрастает количество продуктов их износа, попадающих в зону трения металлов. В результате металл начинает изнашиваться медленнее. Однако в этом процессе наблюдается насыщение, влияние нагружения смазывающих элементов носит затухающий характер.

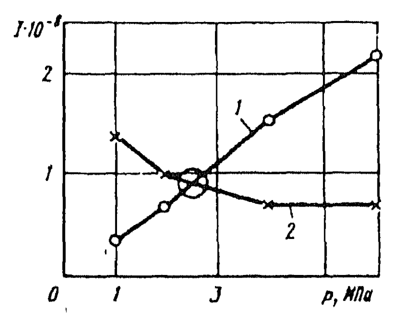


Рис.2.13. **Влияние нагрузки, приложенной к смазывающему элементу, на интенсивность изнашивания вставок (1) и металла (2)**

Вне участка насыщения, если нагрузка на смазывающие элементы изменяется, изменяется и интенсивность износа металла, но происходит это с некоторым запаздыванием, отражающим определенную инертность сервовитного слоя [63].

Исходя из вышеприведенных рассуждений, М.Б. Рубин и В.М. Зиновьев разработали подшипник с поверхностью трения, состоящего из чередующихся металлических *1* и полимерных *2* элементов (рис. 2.14).

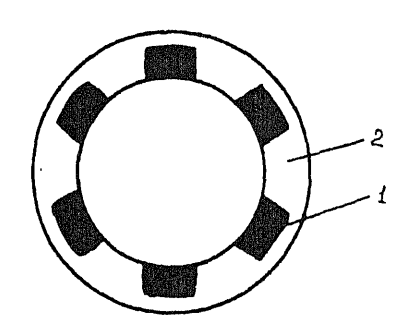


Рис. 2.14. **Подшипник со смазывающими вставками:**
1 – смазывающая вставка; *2* – подшипник

Основа изготавливается из медного сплава, для вставок используют ПТФЭ, наполненный графитом. При работе такого подшипника продукты износа вставок переносятся контртелом и попадают в зону контакта металлов. Здесь создаются благоприятные условия для протекания ИП. Избирательное растворение медного сплава происходит под действием воды и ускоряется трением. Однако в присутствии воды медная пленка, которая возникла в результате уноса легирующих элементов, быстро окисляется, и интенсивность изнашивания увеличивается.

Характер происходящих явлений изменится, если в зону контакта металлов ввести вещества, благодаря которым химическое равновесие изменится в сторону восстановительных процессов, что обеспечит более устойчивый режим ИП. Таким веществом является материал вставок. Образующийся сервовитный слой при работе пары трения обладает высокой несущей способностью.

Создание несущего сервовитного слоя при смазывании водой происходит постепенно и сопровождается увеличением площади контакта и снижением интенсивности изнашивания. Сервовитный слой способен некоторое время сохранять свои свойства и после прекращения подачи воды, обеспечивая малую интенсивность изнашивания. Испытания на машине трения МФТ-1 при нагрузке 10 МПа и скорости скольжения 0,05 м/с показали следующее (рис. 2.15).

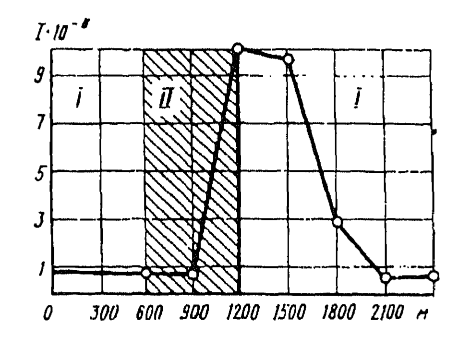


Рис 2.15. **Увеличение интенсивности изнашивания после прекращения подачи воды в зону трения:**
I – в зону трения подается вода; *II* – подача воды прекращена

Когда в зону трения перестала поступать вода, интенсивность изнашивания осталась примерно на том же уровне, что и в воде на пути трения 300 м. Затем износ начал быстро увеличиваться и интенсивность изнашивания возросла более чем в 10 раз. Однако если подачу воды в зону трения возобновить, то поверхности по-

степенно "исправляются" и интенсивность изнашивания возвращается к прежнему уровню.

В работах [61, 62] Б.М. Рубин пришел к выводу, что физико-химические процессы в зоне контакта подшипника, работающем на воде, носят самоорганизующийся характер. Саморегулирование осуществляется следующим образом. Допустим, что при неизменной внешней нагрузке вследствие снижения температуры и различия в коэффициентах линейного расширения материалов произошло уменьшение контактного давления на вставке. Это повлечет за собой некоторое увеличение давления на металлических участках и уменьшение интенсивности изнашивания вставки. В зону фрикционного контакта начнет поступать меньшее количество реагента, обеспечивающего восстановление окислов меди при образовании антифрикционного слоя. Возникнет избыток окислов, который в виде продуктов износа будет покидать зону трения. Следовательно, интенсивность изнашивания медного сплава возрастет. Снижение интенсивности изнашивания вставки и рост износа металла изменят соотношение между упругими деформациями компонентов таким образом, что контактное давление на вставке увеличится. Результатом этого будет повышение интенсивности изнашивания вставки, что повлечет за собой снижение интенсивности изнашивания металла и возврат системы к равновесному режиму.

Б.М. Рубин, В.М. Зиновьев, Б.С. Дмитриев и др. [22] разработали технологический процесс изготовления подшипников, работающих на морской воде, и организовали их массовое производство для объектов морского флота. В результате упростилась конструкция узлов трения, повысилась надежность их работы, снизились затраты на техническое обслуживание. Прежние конструкции подшипников, работающих под водой, требовали подвода и отвода смазочного материала, создание уплотнений, а также необходимого контроля за работой насосов и возможных утечек смазочного материала. Можно отметить такой факт. При переходе за бортом на новые подшипники, реализующие ИП при смазке морской водой, только на одном из объектов потребность в медных трубках, подводящих и отводящих смазку к подшипникам, сократилась на несколько километров.

3.2. Главные и вспомогательные двигатели, подшипники валопроводов морских судов

Работа Л.К. Козлова

Институт Севгипрорыбфлот (г. Мурманск) [30] накопил достаточно большой опыт использования эффекта избирательного переноса в узлах трения судовых технических средств. Работа проводилась по двум направлениям:

1) применение антифрикционной медьсодержащей присадки МКФ-18УМ (ТУ 113-12-11.076—87) к базовым маслам на судах, находящихся в эксплуатации;

2) использование методов финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) деталей дизелей и другого оборудования в период их ремонта с последующей обкаткой по сокращенной программе с использованием присадки МКФ-18УМ.

Применения медьсодержащей присадки МКФ-18УМ к базовым маслам на судах, находящихся в эксплуатации

Присадка была введена в смазочное масло, используемое в следующих механизмах:

1. На 15 судах ПСТ пр.1332:

— главный двигатель 6TsR 52,5/72 мощностью 2200 эл. с.;

— редуктор главного двигателя и привода генераторов LS-2200;

— опорный и упорный подшипники валопровода;

— редуктор валоповоротного устройства;

— два вспомогательных двигателя 6ЧН18/22 мощностью 225 э.л.с. каждый;

— четыре сепаратора топлива и масла типа СЦ-1,5/11 (редукторы) производительностью 1000...2500 л/ч.

2. На 16 судах ТСМ пр.333 и НИС пр.833:

— два главных двигателя 8VD 26/20AL-2 мощностью 1200 э.л.с. каждый;

— редуктор главных двигателей 2×882 кВТ;

— два опорных и упорный подшипники валопровода;

— два вспомогательных двигателя 8VD 26/20AL-2 мощностью 900 э.л.с. каждый;

— три сепаратора топлива и масла SOZA/5-SS7 (редукторы) производительностью1500...3000 л/ч;

— пять винтовых компрессоров S3-315 и два винтовых компрессора S3-900 производственной холодильной установки.

3. На 10 судах СРТМ пр.502ЭМ:

— главный двигатель 8NVD-48AV мощностью 1000 э.л.с.;

— опорный и опорно-упорный подшипники валопровода;

— два вспомогательных двигателя 6ЧН 18/22 и два двигателя 6Ч 18/22 мощностью соответственно 225 и 150 э.л.с.;

— два сепаратора топлива и масла СЦ-1,5/11 (редукторы) производительностью 1000...2500 л/ч.

Количество вводимой просадки МКФ-18УМ в смазочное масло указанных механизмов составляло 0,2% от количества масла в системе смазки. В результате угара масла в главных и вспомогательных двигателях добавлялось свежее масло с присадкой 0,1%.

По отзывам обслуживающего персонала присадка МКФ-18УМ в масле положительно влияет на работу механизмов. Так, на судне МГ-1363 была введена присадка в смазочное масло главного двигателя и его редуктора в количестве 0,2%. Главный двигатель и редуктор отработали в рейсе 818 ч. В главном двигателе до введения присадки перегревался один из рамовых подшипников коленчатого вала и наблюдались шумы в рабо-

те редуктора. После введения присадки температуры подшипников двигателя выравнились, шумы в редукторе уменьшились. На поверхностях трения деталей был обнаружен налет меди.

Главный двигатель работал на масле М10Г2ЦС. Лабораторный анализ показал, что масло было пригодно к дальнейшей эксплуатации. После очередного рейса МГ-1363, в котором главный двигатель отработал 1360 ч, был произведен осмотр гитары привода газораспределительного механизма и привода регулятора, а также редуктора привода генераторов. В зонах контакта зубьев блок-шестерни привода регулятора и зубьев вала шестерни привода генератора переменного тока отмечено отложение меди. Поверхности шестерен регулятора были без повреждений, их техническое состояние хорошее. В целом отзывы обслуживающего персонала о применении присадки МКФ-18УМ при циркуляционной смазке положительны.

Присадка МКФ-18УМ использовалась в масляной системе топливных насосов дизелей 8VD 26/20AL-2 и 6VD/ 20AL-2 и 6VD/20AL-2 на нескольких судах ТСМ. До введения присадки в масло у топливных насосов нагревались подшипники. Кулачковый вал насоса имеет два подшипника и в середине опирается на дополнительную чашу подшипника скольжения. Кулачковый вал вращается в масляной ванне, обеспечивая одновременно смазывание роликовых толкателей. Чтобы предотвратить выход из строя топливных насосов, часто меняли масло. С введением присадки в масляные системы насосов нагрева подшипников не наблюдалось. Срок службы насосов увеличился. Было рекомендовано дальнейшее использование металлоплакирующих присадок в смазочной системе насосов.

В программу исследований входила также оценка влияния металлоплакирующей присадки на пусковые качества дизеля. С этой целью при запуске дизеля подачу воздуха в цилиндры производили из одного штатного пускового баллона, заполненного до установленного давления (2,4 МПа). Пуски производили без пополнения запаса воздуха в баллоне и заканчивали при минимальном давлении, при котором запуск дизеля невозможен. Пуски дизеля до и после ввода присадки в масло производили в три этапа для получения более достоверного результата. Обобщенные данные испытаний представлены на рис. 2.16.

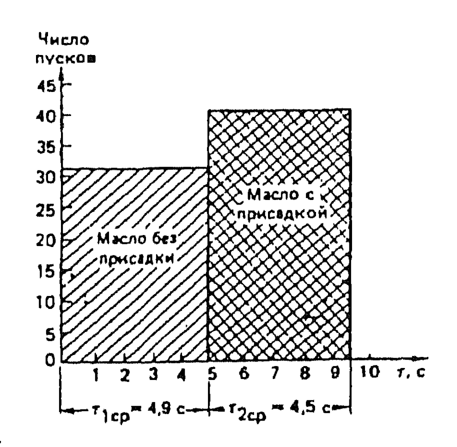


Рис. 2.16. **Изменение пусковых качеств дизеля при вводе в масло присадки МКФ-18УМ:**

τ_{1cp} – средняя продолжительность пуска дизеля с присадкой в масле; τ_{2cp} – средняя продолжительность пуска дизеля без присадки в масле

Как видно из рисунка, число пусков дизеля до ввода в масло присадки МКФ-18УМ равно 32, тогда как после ввода присадки

равно 41 (пуски проводили после работы дизеля с присадкой в течение 300 и 600 ч). Число пусков дизеля, работавшего с присадкой, в среднем на 9 пусков больше, чем дизеля, работавшего на масле без присадки при одном и том же расходе пускового воздуха.

Средняя продолжительность пуска до введения присадки 4,9 с, после введения присадки — 4,5 с, что свидетельствует о положительном влиянии присадки на пусковые качества дизеля вследствие снижения потерь на трение.

После длительной работы дизелей на масле с присадкой МКФ-18УМ не было выявлено снижения расхода топлива и износа трущихся деталей. Можно предполагать, что небольшое количество присадки в масле (0,2%) не обеспечило образования достаточно толстой сервовитной пленки на трущихся поверхностях, что могло бы уменьшить величины зазоров в сочленениях двигателя. Введение присадки снизило силы трения между трущимися поверхностями, и это сказалось на температурном режиме подшипников скольжения, пусковых режимах двигателей, снижении шумности редукторов и продлении сроков службы масла [30]. При введении металлоплакирующей присадки нельзя не учитывать образование в зоне трения серфинг-пленки в зоне контакта деталей. Эта пленка существует только в процессе трения, она разделяет контактируемые поверхности и действует подобно граничной пленки масла при полужидкостном трении. Снижение износа деталей и расхода топлива двигателями было отмечено при применении финишной антифрикционной обработки (ФАБО) трущихся поверхностей.

ФАБО деталей судовых дизелей и других механизмов

Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) поверхностей деталей узлов трения проводилась Л.К. Козловым двумя способами [30]:

— фрикционно-механическим воздействием латунного прутка при смазывании технологической жидкостью (трилон Б, глицерин, соляная кислота, хлористое железо, хлористый цинк и др. компоненты);

— нанесением медной пленки с применением металлоплакирующей рабочей среды (углекислая медь, соляная кислота, глицерин и др.).

Работы проводились в период ремонта или технического обслуживания механизмов. Была разработана конструкторская и технологическая документация на ФАБО судового вспомогательного дизеля 6ЧН 18/22, которая была применена на судоремонтном заводе.

В результате использования ФАБО сократилось время обкатки дизеля в 1,5...2,5 раза после капитального ремонта, повысилось качество прирабатываемых поверхностей, улучшились технические параметры работы дизеля (температурный режим, шумность, расход топлива и др.).

Работы выполняли по технологической инструкции 8844-М6-001 ТИ, согласно которой ФАБО подвергаются коленчатый вал, цилиндровые втулки, поршневые кольца, распределительный вал, цапфы шестерен механизма газораспределения.

Была разработана техническая документация на приспособления по ФАБО цилиндровых втулок диаметром от 180 до 320 мм, коленчатых валов и других деталей дизелей 8VD 26/20AL-2; 8ЧН 25/34-2; 6L 525 11Hvv.

На трех судах СРТМ пр. 502ЭМ (МИ-0309, МИ-1545 и МИ-0315) ФАБО обрабатывали поршневые кольца главных двигателей 8VD 48 AV. Двигатели работали на масле с присадкой МКФ-18УМ.

По отзывам обслуживающего персонала ФАБО с применением присадки МКФ-18УМ в смазочном масле оказывает положительное действие на работу двигателей — они стали работать мягче, давление масла после фильтра увеличилось на 0,1 кгс/см^2. На судне МИ-0309 после наработки двигателем 1200 ч наблюдалось увеличение давления сжатия в цилиндрах.

Кроме поршневых колец ФАБО подвергали плунжеры топливных насосов главных и вспомогательных двигателей (на судах БИ-1419, БИ-0621, БИ-0622). Наиболее частым дефектом плунжерных пар является износ плунжера и втулки. В среднем около 80% плунжерных пар отечественного производства бракуются по причине их износа и падения гидравлической плотности. Основной вид износа — кавитационные и эрозионные разрушения рабочих поверхностей прецизионных направляющих плунжера и втулки. Эпизодически наблюдаются выходы из строя плунжерных пар вследствие коррозионных разрушений направляющих поверхностей.

Как показал осмотр, плунжеры с ФАБО после эксплуатации имели хорошо приработанные поверхности (при использовании качественного топлива). При исключении попадания забортной воды в топливо плунжер с покрытием отрабатывает срок между операциями доводки уплотнительных торцов плунжерных пар в среднем в 1,5 раза больше плунжера без покрытия.

ФАБО подвергали также иглы распылителей форсунок. Покрытие их медной пленкой с помощью металлоплакирующей рабочей среды было проведено на пяти судах (БИ-1419, БИ-0622, БИ-0621, БИ-0642).

Характерными дефектами распылителей являются износ распыливающих отверстий, повреждение уплотнительных торцевых поверхностей, эрозионный износ.

Ресурс распылителей отечественного производства 8...10 тыс. ч, в действительности они работают 4...5 тыс. ч. Коксование распылителей происходит при использовании некачественного топлива (обводненное топливо). По результатам наблюдений распылители отечественного производства с металлоплакированным покрытием отрабатывают между доводочными операциями 1,5...2 срока.

В результате выполненных работ было рекомендовано металлоплакирование поверхностей плунжера и распылителя применять по усмотрению судовых специалистов в зависимости от качества используемого топлива [30].

4. Машины и аппараты химических производств

Работы к.т.н. Б.Д. Воронкова и В.Г. Шадрина

Известно, что основной причиной выхода из строя трущихся деталей машин и аппаратов химических производств является коррозионно-механический вид изнашивания.

Узлы трения работают в условиях воздействия коррозионно-активных сред, высоких температур и давлений, вследствие чего их ресурс работы и надежность недостаточны. Интенсивному изнашиванию подвергаются детали насосов, перекачивающих кислоты и щелочи, аппаратов с перемешивающими устройствами, смесителей, червячных прессов, валковых выделителей и др. [7, 11].

В химическом оборудовании подшипники, уплотнения, валы и другие элементы изготавливаются из коррозионно-стойких материалов, а смазывание их производится водой, бензином, метанолом и смесями химических продуктов, большой частью представляющими собой кислый или щелочной электролит.

Обследование оборудования на химических комбинатах, проведенное Б.Д. Воронковым и В.Г. Шадриным, аппаратов с перемешивающими устройствами при производстве капролактама, выращивания микроорганизмов и др., червячных машин при производстве синтетических каучуков, валковых устройств и др. показало, что узлы трения этих машин подвержены еще и водородному изнашиванию, часто в сочетании с другими видами изнашивания (абразивным и фреттинг-коррозии).

Обследованием установлено, что водородный износ в ряде случаев является одной из основных причин снижения срока службы химического оборудования, поскольку процесс трения протекает в электролитах, имеет электрохимическую основу и подчиняется электронным процессам.

Как отмечает Б.Д. Воронков [9, 10], наряду с восстановлением ионов водорода на поверхности трения (катоде) происходит сдвиг потенциалов (поляризация). Этот сдвиг возбуждает ток коррозии от трения, вследствие чего коррозия увеличивается в сотни раз в сравнении с коррозией без трения скольжения (в статике). С этой точки зрения отличие водородного изнашивания от водородной коррозии (коррозионного изнашивания) состоит в том, что водородному изнашиванию подвержены коррозионно-стойкие материалы. Сдвиг потенциалов (поляризация) возбуждается трением. При этом трение многократно усиливает коррозию тех материалов, которые ей подвержены, и возбуждает коррозию у тех материалов, которые без трения (в статическом состоянии) не подвергаются коррозии [7].

Известные способы использования эффекта избирательного переноса для нанесения смазывающих металлических пленок на поверхности трения такие, как: применение металлоплакирующих смазочных материалов, использование процесса ФАБО, применение различных марок бронз и др. при коррозионно-механическом изнашивании оказались недостаточно эффективными.

В связи с этим Б.Д. Воронков и В.Г. Шадрин рассмотрели возможность использования в узлах трения химического оборудования эффекта ИП и провели ряд исследований. Они считают, что при трении деталей в коррозионно-активных средах всегда создается трибоэлектрическое поле, а если трение происходит в среде электролита, то под действием трибо-термо ЭДС (ТЭДС) заряженные частицы (ионы) приобретают направленное движение в зону фрикционного контакта. Положительно заряженные ионы (катионы) под действием трибоэлектрического поля движутся к катодным участкам поверхности трения деталей, где, присоединяя недостающие электроны, восстанавливаются до нейтральных атомов по уравнению

$$K^{n+} + n\bar{e} \rightarrow A_0,$$

где К — положительно заряженный ион; $\bar{e}$ — электрон с зарядом "–1"; A_0 — нейтральный атом [11].

В соответствии с этим уравнением ионы водорода, присутствующие в электролите (смазочной среде пары трения), восстанавливаясь до атомов, диффундируют в глубь металла, разупрочняя его и усиливая износ трущихся поверхностей деталей. ИП будет защищать трущиеся детали от водородного изнашивания, создавая на поверхностях трения медную пленку. Из приведенного выше выражения необходимым условием реализации ИП в коррозионно-активных средах является наличие в электролите (смазочной среде) ионов меди.

Исследователи считают, что для обеспечения этого условия можно применить в узле трения коррозионно-стойкий сплав, содержащий медь или металлоплакирующий смазочный материал в виде водного раствора соли меди. Необходимым источником энергии для осуществления процесса осаждения медного слоя является ТЭДС. Процесс осаждения меди на поверхностях трения имеет общую природу с электролизом. Возникновение ТЭДС в процессе трения объясняют явлением Зеебека, согласно которому в замкнутой электрической цепи возникает ТЭДС, если температура на контакте разная.

Можно приближенно считать, что зона трения в трущейся паре имеет температуру T_1 (горячий контакт), а замкнутые через электролит (смазочный материал) поверхности меньшую температуру T_2 (холодный контакт), тогда ТЭДС будет пропорциональна разности температур и некоторому коэффициенту a, называемому удельной ТЭДС. ТЭДС в контакте будет равна $a\,(T_1 - T_2)$.

ТЭДС, возникающая при трении, вызывает отклонение потенциалов электродов (трущихся деталей) от значений, которые бывают при отсутствии трения. Такое отклонение влечет за собой протекание электродных процессов: на катодных участках в зоне фрикционного контакта пары трения будет происходить восстановление ионов меди и водорода:

$$Cu^{++} + 2\,ё \rightarrow Cu^0$$
$$H^+ + ё \rightarrow H^0 .$$

Достаточно самого малого отклонения потенциалов, чтобы этот процесс начался.

Исследования показали, что реализация эффекта ИП позволяет сделать процесс восстановления ионов меди доминирующим в зоне фрикционного контакта пары трения и свести, таким образом, износ поверхности к минимуму.

Рассмотрим практические результаты, полученные Б.Д. Воронковым и В.Г. Шадриным [8—11].

1. При работе пары трения сталь 14Х17Н2 по стали 12Х18Н10Т при давлении $p = 0{,}2$ МПа и скорости скольжения $v = 3{,}2$ м/с с металлоплакирующим смазочным материалом износ подвижного кольца отсутствовал, а интенсивность изнашивания неподвижного кольца была в 10 раз ниже, чем при других режимах (p и v), когда происходило наводороживание, приводившее к поверхностному разрушению трущихся деталей. Эффект избирательного переноса наблюдался не во всех режимах. Области реализации ИП в коррозионно-активных средах показаны на рис. 2.17. Металлоплакирующий смазочный материал представлял собой подкисленный водный раствор сернокислой меди, который содержал ионы меди и водорода. В результате трения смазочный материал формирует защитную медную пленку, которая способна к самовосстановлению.

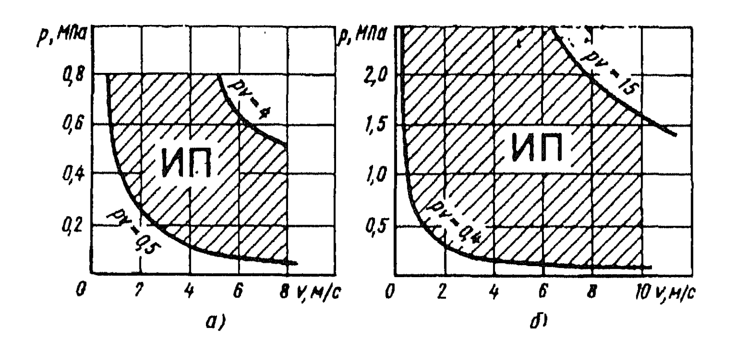


Рис. 2.17. **Области реализации ИП в парах трения:**
а — сталь 14Х17Н2 по стали 12Х18Н10Т; *б* — материал ВК6 по ВК6

2. Разработана композиция Ф40Б70 на основе фторопласта-40 с добавлением 70% бронзовой дроби. Ее использовали для изготовления сепараторов шарикоподшипников электроприводов аппаратов с механическим перемешивающим устройством. Испытания в различных смазочных средах (кислые электролиты) выявили высокую износостойкость таких шарикоподшипников. Дорожки трения подшипников при работе покрывались тонким слоем меди, что способствовало компенсации износа, стабильности зазоров, снижению уровня шума и вибрации электродвигателя.

3. Для исследования долговечности опор скольжения и торцевых уплотнений валов химических аппаратов использовали твердосплавный материал, состоящий из релита и меди (релит – мелкоизмельченный карбид вольфрама). Опора (рис. 2.18) имеет износостойкие втулки 3 и 4 и

фальш-втулки 1, 2 и 5, обеспечивающие ее работу в режиме ИП при трении в среде водного раствора серной кислоты.

Износостойкие втулки изготовляли по технологии ВНИИ-компрессормаш с рабочими поверхностями трения из материала ВК, фальш-втулки изготовляли из коррозионно-стойких сталей, легированных медью, хромом и никелем. В процессе работы поверхности трения вала и опоры работали в режиме ИП.

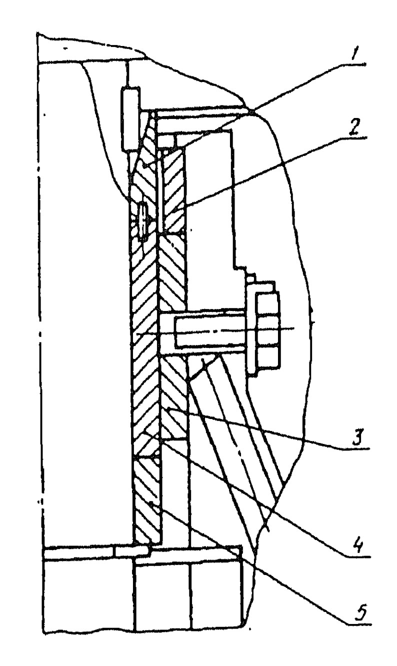


Рис. 2.18. **Опора вала перемешивающего устройства:**
1, 2 – фальш-втулки; *3, 4, 5* – износостойкие втулки

4. На рис 2.19 приведен образец конструктивного выполнения элемента аксиальных уплотнительных устройств.

Основу уплотнительного кольца *1* изготавливают из коррозионно-стойкой стали, а рабочую поверхность трения *2* — из композиционного материала релит-медь. Смазочным материалом для пары трения аксиального уплотнительного устройства служит технологический концентрат – водный раствор электролита, pH = 6,8...8.

Авторы работ провели стендовые испытания серийного образца электропривода ВАГЖ-40-2-122К-ВЗГ, в котором были установлены подшипники скольжения и кольца торцевого уплотнения из твердого сплава ВК6-М. В качестве смазочного материала использовали водопроводную воду и металлоплакирующий смазочный материал, содержащий сернокислую медь. Если при работе на водопроводной воде происходило интенсивное тепловыделение и сплав ВК6-М растрескивался, то при работе на металлоплакирующем смазочном материале поверхности трения колец из материала ВК6-М покрывались тонким слоем меди и следов терморастрескивания не было. Подшипники скольжения в течение 100 ч с 40 пусками — остановками износа не имели; снизились уровень шума и вибрация электродвигателя.

Кольца торцевых уплотнений из материала релит—медь проходили промышленные испытания в торцевом уплотнении насосов, перекачивающих технологический концентрат, который представлял собой электролит с pH = 6,8...8, что соответствует слабокислому и слабощелочному растворам.

При смазывании пар трения релит—медь технологическим конденсатом реализуется ИП. За 5000 ч работы вала с

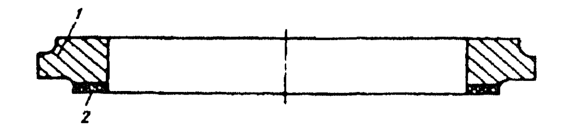


Рис. 2.19. **Уплотнительное кольцо:**
1 – стальная основа; *2* – износостойкое покрытие

частотой вращения 3000 об/мин, при температуре среды 145°С заметного износа колец не наблюдалось. Переборок насоса и остановок технологической линии в течение этого времени не потребовалось.

5. Были проведены работы по повышению долговечности металлопластмассовых опор скольжения валов химических аппаратов с использованием ИП. На рис. 2.20 показан металлополимерный подшипник с антифрикционными вставками-протекторами, обеспечивающими как дополнительное смазывание, так и режим ИП.

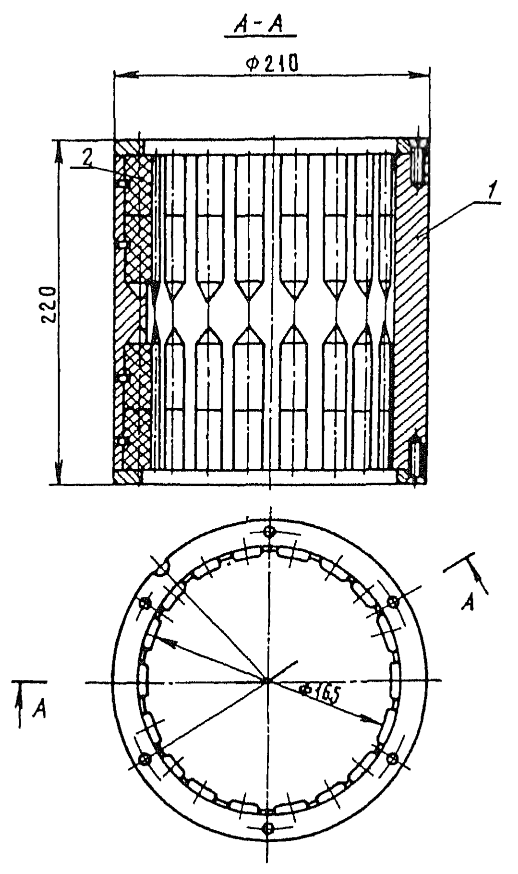


Рис. 2.20. **Металлополимерный подшипник со вставками протекторами:**
1 – корпус; *2* – вставка

При коррозионной рабочей среде аппарата, являющейся также смазывающей средой, для возбуждения ИП корпус изготовляли из стали 12Х18Н10Т, а вставки – протекторы из фторопластовой композиции Ф4-К20 и бронзы БрО5Ц5С5 с чередованием их по окружности.

6. Предложена также конструкция опоры, корпус которой выполнен из бронзы БрАЖ 9-4, а вставки-протекторы – из фторопластовой композиции Ф4-К 20; крышки подшипника — из медных сплавов (бронзы, латуни). Такие подшипники скольжения имеют долговечность (в том числе

для крупногабаритных аппаратов с тяжелыми валами) в 3...4 раза выше, чем подшипники из пластмасс. Особенно эффективно применение подобных подшипников скольжения в опорах аппаратов, рабочая среда которых содержит абразивные взвеси.

7. Авторы исследований изучили работу протекторных подшипников в лабораторных и промышленных условиях. На рис. 2.21 приведена конструкция металлополимерного подшипника, имеющего сборный вкладыш передней опоры червячного пресса для обезвоживания синтетического каучука.

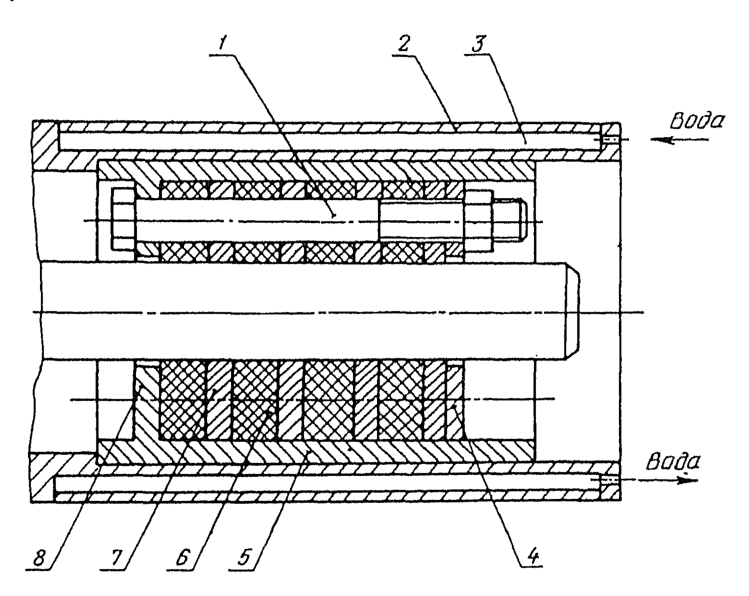


Рис. 2.21. **Сборный вкладыш подшипника скольжения**

Сборный вкладыш подшипника скольжения содержит корпус *5*, снабженный упорным фланцем *8*; установленные в нем в чередующемся порядке пластмассовые пластины *6* и металлические пластины *7*; подвижный фланец *4*, свободно входящий в корпус, связанный с упорным фланцем болтами *1* регулируемого натяга, проходящими через сквозные отверстия, выполненные в пластинах *6* и *7* параллельно оси вала. Сборный вкладыш подшипника установлен в обойме *2*, снабженной рубашкой охлаждения *3*.

В зоне трения образуется пленка меди, в результате чего вкладыш уменьшается. Болтами периодически подтягивают всю сборную конструкцию вкладыша и компенсируют изменение линейных размеров пластмассы под действием внутренних напряжений. В качестве пластмассы вместо обычно используемого при температуре 200°С и выше ПТФЭ применен наполненный графитом графитофторопласт 7В-2А со значительно большим коэффициентом теплопроводности, а для металлических пластин – бронза или латунь.

Подвергаясь незначительному избирательному коррозионному растворению в расплаве полимера с последующей пассивацией, при которой образуется пленка меди, пластины из латуни являются не только антифрикционными элементами, но и обеспечивают ИП. На основании выполненных исследований авторы пришли к выводу, что расплавы полимеров являются средой, в которой может реализоваться ИП.

8. ЛенНИИхиммашем разработаны шестеренные устройства, предназначенные для выгрузки полимера (полистирола) из аппаратов и транспортирования его по трубопроводам [28]. В этих устройствах подшипники скольжения работают при давлении до 2 МПа, скорости скольжения до 0,235 м/с, температуре 180°С, смазывание осуществляется расплавом полимера, т.е. транспортируемой рабочей средой. Срок службы подшипника скольжения из бронзы БрО5Ц5С5 при ведущем вале из стали 14Х17Н2 и ведомом вале из стали 95Х18 составляет не менее 2,5...3 лет. Анализ полученных результатов позволил установить, что данная пара работает в режиме ИП.

9. Уплотнение высоконапорного питателя-выгружателя (рис. 2.22) состоит из корпуса *12* с термостатированной рубашкой *11*, набора чередующихся антифрикционных неметаллических *7* и металлических 10 колец, образующих с валом *9* лабиринтную щель *8*, и нажимного устройства с крышкой *3* и корпусом *6*, разделенных кольцом *5*.

Крышка нажимного устройства имеет камеру *1*, рубашку охлаждения *13* и осевые дроссельные отверстия *2*; она крепится к корпусу уплотнения

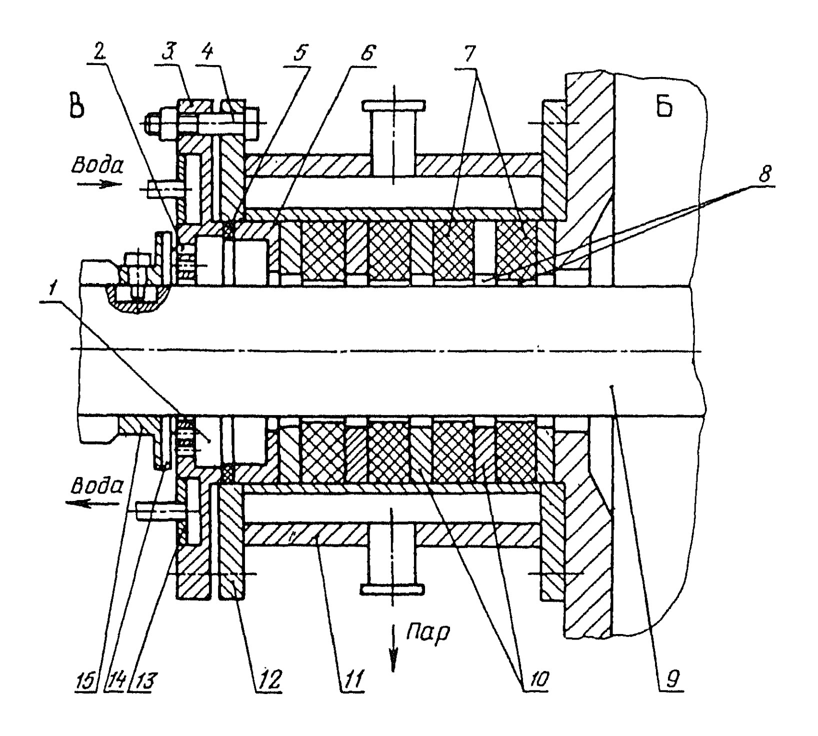


Рис. 2.22. Уплотнение вала высоконапорного питателя-выгружателя

болтами *4*. На валу укреплен нож *15* с установленным осевым зазором между его режущей кромкой *14* и крышкой нажимного устройства.

Рабочая полость *Б* питателя-выгружателя заполнена раствором или расплавом полимера с температурой и давлением, значительно превышающими температуру и давление полости *В* (атмосферные условия). При вращении вала в рубашку *11* подается пар, а в рубашку охлаждения *13* — водопроводная вода. При течении расплава полимера через лабиринтную щель его давление падает, температура поддерживается постоянной во избежание затвердевания полимера. При поступлении расплава в камеру *1* происходит его расширение с падением давления и температуры и одновременно дополнительное охлаждение охлаждающей рубашкой *13* и в дроссельных отверстиях *2* при дросселировании. В результате давление расплава снижается до атмосферного, а вязкость его повышается, и он выдавливается через отверстие *2* в виде прутков. Режущая кромка ножа разрезает прутки полимера на гранулы, которые попадают в приемный бункер и используются вместе с готовым продуктом.

Рекомендуемый материал антифрикционных неметаллических колец – текстолит конструкционный ПТК, металлических колец – латунь ЛЖМц59-1-1.

Рассмотренная конструкция уплотнения вала позволяет не только предотвратить утечки полимера в окружающую среду, но и в результате образования защитной медной пленки устранить износ и задиры вала.

5. Машины и аппараты бытовой техники

Компрессоры фреоновых холодильных агрегатов предназначены для осуществления циркуляции фреона-12 по агрегату. Фреон-12 хорошо растворяется в масле; маслофреоновую смесь используют для смазывания трущихся деталей. Небольшое количество масла вместе с фреоном циркулирует по всей системе холодильного агрегата.

Соблюденение жестких требований к холодильным агрегатам и смазочным маслам, к их стабильности, влажности и чистоте не исключает протекания сложных химических и электрохимических процессов в рабочих средах и на поверхностях трения деталей. В результате в некоторых компрессорах происходит образование медной пленки на трущихся поверхностях деталей (поршне, коленчатом валу и в подшипниках). Это явление получило название омеднения. Характерной особенностью данного процесса является то, что омеднению подвергаются трущиеся детали из стали и чугуна, хотя медь в состав их не входит.

Исследованию процессов, происходящих в компрессорах фреоновых холодильных агрегатов, посвящен ряд работ российских и зарубежных ученых [54...57, 80...82]. Согласно выдвинутой гипотезе любое смазочное масло растворяет некоторое количество меди; степень растворения меди в основном зависит от содержания в масле органических кислот, смол и пр. Медь, как было указано ранее, поступает в смазочную систему в результате растворения медных трубок охладителя [77].

Другие примеси, такие как вода или продукты разложения масла, увеличивают растворимость меди. Разлагаясь при высоких температурах, фреон образует хлористый водород. Как только его содержание превысит некоторую критическую концентрацию, медный комплекс становится неустойчивым. Медь осаждается на поверхности трения деталей, а железо переходит в раствор. На два растворяющихся атома железа приходится один атом осажденной меди. Ионы хлора, находящиеся в избытке, действуют как противоионы, стабилизируя растворенное железо в виде комплекса и поддерживая электрохимическое равновесие системы.

Исследование качественного и количественного состава кислот в маслах, поступивших на ремонт герметичных холодильных агрегатов, показали, что продукты разложения масел в основном представляют жирные кислоты. Причем из низших жирных кислот больше всего в масле содержится валериановой и капроновой кислот, из высших – олеиновой и линоленовой.

О физико-химических превращениях во фреоновом холодильном агрегате можно судить по снижению микротвердости поверхностей трущихся деталей компрессора, чего не наблюдается при трении в аммиачных средах.

Таким образом, как показывают приведенные данные, в компрессорах бытовых холодильников происходит избирательное растворение, перенос и осаждение меди на площадках фактического контакта трущихся деталей. Образуется тонкая медная пленка, препятствующая возникновению задиров во время пуска компрессора. Наличие высших жирных кислот в масле способствует улучшению его смазывающей способности и формированию защитного хемосорбционного слоя на образовавшейся пленке меди. Следовательно, имеются все признаки для того, чтобы отнести данное явление к одной из форм ИП, наступающего при наличии металлоплакирующего смазочного материала.

Несмотря на то что омеднение деталей в компрессорах холодильников известно давно, механизм образования защитной пленки меди изучен недостаточно, не выяснено влияние фреона на протекание данного процесса. В связи с этим была поставлена задача экспериментальным путем выяснить, какие продукты разложения масло-фреоновой смеси способствуют формированию медной пленки на фрикционном контакте, и разработать способы инициирования ИП при трении деталей из стали и чугуна.

Медьорганические соединения в процессе эксплуатации холодильника образуются в течение длительного времени (несколько лет) при наличии благоприятных условий, поэтому для испытаний были специально синтезированы соли меди жирных кислот, которые вместе с жирными кислотами вводили в смазочное масло в качестве присадок. Данная работа проводилась под руководством Ю.С. Симакова.

Работы д.т.н. проф. А.К. Прокопенко

Наиболее полно работы А.К. Прокопенко по данному вопросу изложены в его монографии "Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения", изданной в 1987 г. издательством " Легпромбытиздат". В книге затронуты исследования не только российских ученых, но и приведены данные зарубежных исследователей.

Здесь мы кратко изложим некоторые результаты исследований, проведенных А.К. Прокопенко, его сотрудниками и учениками [54...57, 64]. Методика проведения испытаний и приборы, которые были ими созданы для изучения избирательного переноса, рассмотрены в главе 3.

Исследования проводились на установках, позволяющих создать любую рабочую среду (газовую или жидкую). В результате проведенных исследований установлено, что защитная металлическая пленка на трущихся деталях может образовываться в маслах, содержащих сотые доли процента медьсодержащих присадок. При этом коэффициент трения и износ могут понижаться, хотя на поверхностях трения визуально и оптическими методами защитного слоя металла не обнаруживается. Было высказано предположение, что ряд металлоплакирующих присадок на основе медьорганических соединений образуют на поверхностях трения и частицах износа тонкую (несколько атомных слоев) пленку меди. В этом случае частицы износа, представляющие собой сплавы железа, покрываются медью и в среде поверхностно-активного смазочного материала работают аналогично частицам меди, находящимся в глицерине при трении пары сталь – медь [66]. Наличие меди на рабочих поверхностях деталей и частицах износа подтверждено химическим анализом и с помощью электронной микроскопии.

А.К. Прокопенко совместно с Ю.С. Симаковым провели анализ ранее выполненных работ за рубежом и в нашей стране по исследованию масел в герметичных холодильных агрегатов [54, 77...80] и пришли к выводу, что в компрессоре бытового холодильника, где имеет место реализация ИП, в смазочном масле присутствуют высокомолекулярные медьорганические соединения и непредельные жирные кислоты (олеиновая и линолевая). Известно, что в настоящее время в качестве присадок к маслам широко используют соединения жирных кислот со щелочными и щелочноземельными металлами. Металлы, используемые для получения солей жирных кислот, стоят в ряду напряжений левее железа и поэтому не могут восстанавливаться на поверхности трения стальных и чугунных деталях, т.е. они не обладают плакирующим действием. Соединения с этими металлами обладают малой растворимостью в минеральном масле и используются для загущения масел при изготовлении пластичных смазочных материалов.

Соединения, образующиеся в холодильном агрегате, хорошо растворимы в минеральном масле и обладают адсорбционно-пластифицирующим действием и также содержат в своем составе медь.

Критериями качества присадок были выбраны их растворимость в базовом масле и уменьшение трения и износа при испытаниях в масле в широком диапазоне нагрузок и скоростей скольжения. В основу присадки был взят олеат меди [54].

Важным вопросом было решение выбора оптимального состава присадки. Для исследования было изготовлено три присадки, которые в массовых долях составляли:

№ 1 олеат меди (I) – 25 %; олеиновая кислота – 75%;
№ 2 олеат меди (I) – 50 %; олеиновая кислота – 50%;
№ 3 олеат меди (I) – 60%; олеиновая кислота – 40%.

На состав металлоплакирующей присадки было получено авторское свидетельство СССР № 859425.

Испытания присадок проводились на приборе ролик (сталь А12) – ролик (чугун СЧ18-36). Площадь трения составляла $4 \cdot 10^{-6}$ м^2, скорость скольжения – 2 м/с. Испытания велись в течение 1 ч при удельной нагрузке на образцы 2,5 МПа. Базовым маслом служило высокоочищенное минеральное масло ХФ12-16 по ГОСТ 5546—82. Присадка растворялась в масле ХФ 12-16 при температуре 40...60°С в нужной концентрации. Выпадения осадка не наблюдалось.

Результаты испытаний приведены на рис. 2.23. Для удобства обработки и сравнения полученных результатов графики построены в логарифмических координатах.

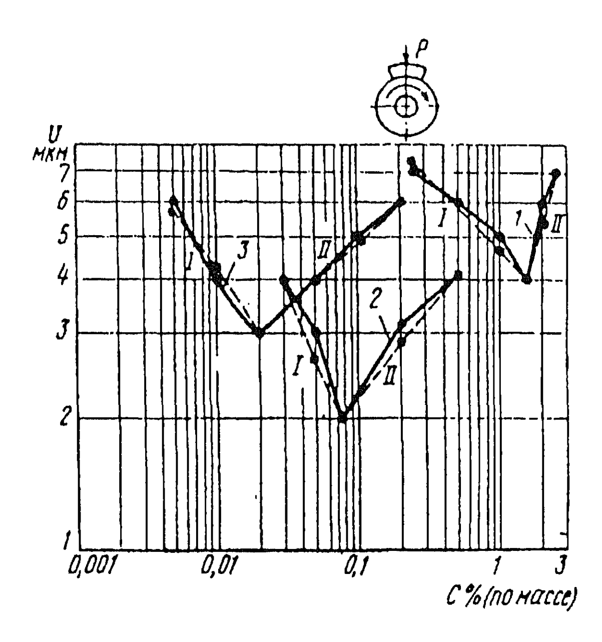


Рис. 2.23. **Зависимость износа от концентрации присадок в масле ХФ12-16 для пары трения серый чугун СЧ18-36 – сталь А12:**
1 – присадка № 1; *2* – присадка № 2; *3* – присадка № 3

Во время испытаний образцов в масле с присадками высокочувствительный датчик, измеряющий суммарный линейный износ, отмечал процесс пленкообразования в контакте под нагрузкой. Происходило наращивание и изнашивание пленок на поверхности трения. Толщина наращивания пленок колебалась от 2 мкм в начальный период и до 1 мкм в установившемся режиме работы. Изнашивание пленок не вызывало изнашивания материала образцов, что имело место при испытании масел с другими присадками. Период данного процесса колебался от 5 до 15 мин. В отдельных случаях наблюдался режим безызносного трения.

На графиках приведены усредненные значения износа с учетом процесса пленкообразования. Использование логарифмических координат позволяет достаточно точно определить в точке перегиба кривой оптимальную концентрацию присадки в масле, при которой наблюдается наименьший износ трущейся пары в данных условиях работы.

Проведенные испытания показали, что наилучшие результаты были получены при использовании присадки № 2 в количестве 0,075% по массе. Большая оптимальная концентрация присадки № 1 (1,5% по массе) обусловлена, по-видимому, недостаточным количеством олеата меди (I) в присадке.

Во всех случаях отмечалось значительное снижение износа испытуемых образцов во время приработки при смазке маслом с указанными присадками.

Повышение износа при отклонениях от оптимальной концентрации присадки, как полагает А.К. Прокопенко, вызвано: при уменьшении концентрации — недостаточным количеством олеата меди (I), при увеличении концентрации – по-видимому, адсорбционным понижением прочности – эффектом Ребиндера. Результаты испытаний А.К. Прокопенко в качественном отношении совпали с данными проведенных ранее исследований [60, 67], где было установлено, что при введении ПАВ в масла лучшие результаты достигаются при определенной их концентрации.

Данные исследований в дальнейшем были использованы для улучшения качества и сокращения времени обкатки компрессоров бытовых холодильников после изготовления и ремонта.

А.К. Прокопенко проводились сравнительные испытания на износ пары трения чугун СЧ18-36 — сталь марки 45 в чистом масле ХФ12-16 и в масле с присадкой при возвратно-поступательном движении образцов (рис. 2.24), скорости 0,12 м/с и удельной нагрузке 2,5 МПа.

Из графиков видно, что введение 0,1 % по массе присадки № 2 в масло позволяет увеличить износостойкость испытуемой пары в 3 раза.

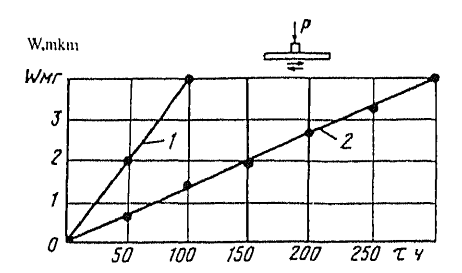


Рис. 2.24. **Износ неподвижного образца из чугуна СЧ18-36 при трении по стали 45 в масле ХФ12-16:**
1 – в чистом масле; *2* – в масле с добавкой 0,1% по массе присадки № 2

Были также проведены испытания образцов, изготовленных из стали А12 (ролик) и чугуна СЧ18-36 (колодка), на установке с вращательным движением. Испытания проводились в течение 6 ч при нагрузке на образцы 5 МПа и скорости скольжения 2 м/с. Площадь образцов составляла $4 \cdot 10^{-6}$ м^2. Использовалось чистое масло и масло с добавкой 0,075% по массе присадки № 2. Суммарный линейный износ образцов за время испытаний составил в чистом масле 16 мкм, а в масле с добавкой – 6 мкм.

Во время испытаний отмечалось сокращение в 4...5 раз времени приработки образцов, смазываемых маслом с присадкой, что определялось по стабилизации основных параметров трения (износа, момента трения и температуры образцов). Во всех опытах, проведенных А.К. Прокопенко, было замечено некоторое увеличение коэффициента трения в первый период работы образцов на масле с присадкой по сравнению с маслом без присадки. Причиной этого автор считал процесс образования металлоплакирующей пленки и протекания физико-химических процессов в зоне контакта. Возможной причиной также могло быть резкое увеличение площади контакта в процессе образования пленки. В последующей работе коэффициенты трения выравнивались.

Испытания на задирную стойкость, проведенные на паре трения чугун СЧ18-36 по чугуну СЧ18-36 при ступенчатом нагружении, скорости 2 м/с и площади образцов $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ м, показали, что при введении в масло 0,1% по массе присадки № 2 предельно допустимая нагрузка пары увеличивается с 6 до 15 МПа.

Прокопенко А.К. провел исследование поверхностей трения образцов, работавших в масле с присадкой, которое подтвердило наличие меди на трущихся поверхностях и частицах износа. Такие исследования проводились в Институте физической химии РАН на растровом электронном микроскопе фирмы "Филипс" с приставкой для микроанализатора "Едакс". На рис. 2.25 приведена микрофотография поверхности трения чугунного образца, работавшего в масле с присадкой. Наличие меди показано участками черного цвета. Общее количество меди в поверхностном слое глубиной 2 мкм составило 37%.

Защитный металлический слой на поверхностях трения состоит из частиц меди и продуктов износа.

Повышение коэффициента трения с малыми концентрациями присадки в масле, замеченное во время испытаний образцов при вращательном движении, вызвано тем, что медьорганические соединения в этом случае хотя и способствуют удержанию частиц износа в зоне трения, но не могут оказать пластифицирующего действия на образующийся металлический слой. При увеличении концентрации присадки в масле коэффициент трения уменьшается.

Далее были проведены испытания по влиянию хладона на процесс металлоплакирования. Ранее действие хладона на процесс трения деталей при граничной смазке практически не изучался. Отрывочные сведения в литературе были противоречивы. В одних работах выражалось мнение, что медная пленка может заклинить компрессор [78], в других считалось, что она может привести к нестабильности масла [80, 81].

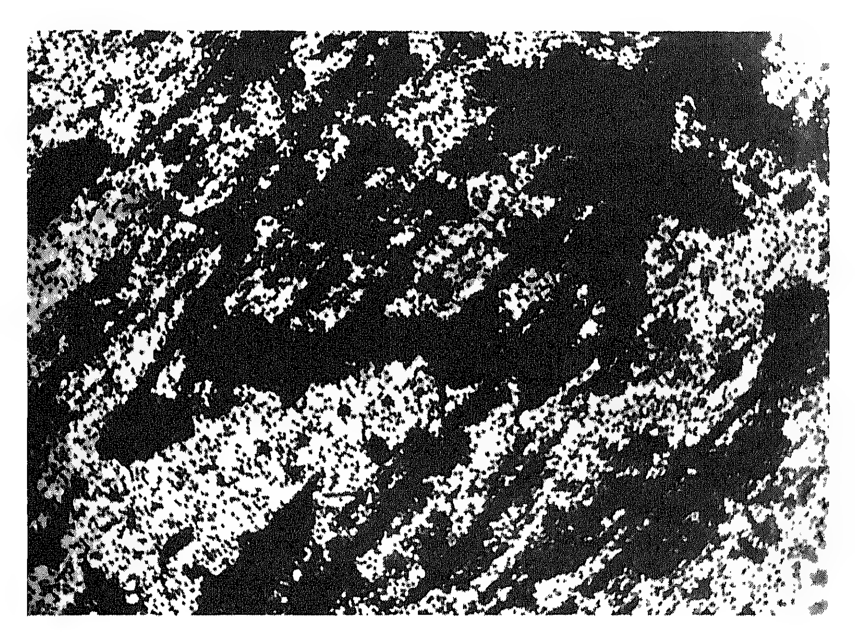


Рис. 2.25. **Поверхность трения чугунного образца (увеличено в 500 раз). Снимок сделан в поглощенных электронах**

А.К. Прокопенко были проведены сравнительные испытания на трение и износ материалов, используемых для изготовления трущихся деталей компрессоров холодильников, на воздухе и хладоне-12, в масле с присадкой и без присадки. Испытания проводились на установке с вращательным движением образцов. Ролик изготавливался из стали А12, колодка – из серого чугуна СЧ 15-32. Площадь трения колодки составляла $4 \cdot 10^{-6}$ м^2. Скорость скольжения образцов было равна 2 м/с, нагрузка – 7,5 МПа. Результаты испытаний в различных средах приведены на рис. 2.26.

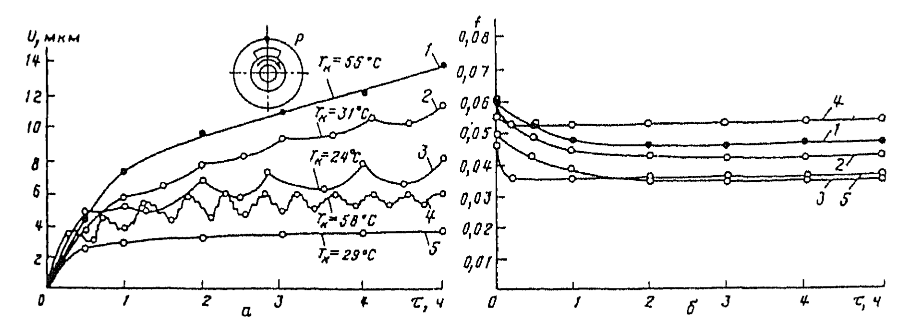


Рис.2.26. **Зависимость трибологических характеристик пары трения чугун СЧ 15-32 по стали А12 от времени при испытаниях в различных средах:**

А – износ образца; *б* – изменение коэффициента трения: *1* – в масле ХФ12-16 на воздухе; *2* – в масле ХФ12-16 с хладоном-12 ($1{,}5 \cdot 10^5$ Па); *3* – в масле ХФ12-16 с хладоном-12 ($4 \cdot 10^5$ Па); *4* – в масле ХФ12-16 с добавкой 0, 075% по массе присадки № 2 на воздухе; *5* – в масле ХФ12-16 с добавкой 0,03% по массе присадки № 2 и хладона-12 ($4 \cdot 10^5$ Па).

Из графиков *1* и *4* видно, что износ испытуемой пары материалов за 5 ч работы в масле с присадкой в 2,5 раза меньше, чем в чистом масле. Коэффициент трения в масле с присадкой выходит на установившийся режим через 0,25 ч, в то время как в чистом масле на это затрачивается 2 ч. Коэффициент трения и температура образцов при введении присадки немного повышается. При трении в среде хладона-12 (графики *2* и *3*) коэффициенты трения уменьшаются с увеличением давления в камере.

При трении в маслохладоновой смеси уменьшается и суммарный износ пары трения. Если в чистом масле за 5 ч работы он составил 13,5 мкм, то в маслохладоновой смеси при давлении хладона-12 $1{,}5 \cdot 10^5$ Па он был равен 11, а при давлении $4 \cdot 10^5$ Па – 8 мкм.

Отмечалось резкое уменьшение температуры образцов при трении в маслохладоновой среде по сравнению с трением на воздухе. Так, при трении в присутствии хладона-12 под давлением $4 \cdot 10^5$ Па температура колодки равнялась 24°C, в то время как на воздухе она составляла 55°C.

Выполненный комплекс триботехнических испытаний показал, что в присутствии хладона-12 улучшается смазывающая способность масла, образование защитной металлической пленки носит более устойчивый характер. Возможно восстанавливающаяся на поверхностях трения медь служит катализатором для продуктов разложения хладона-12 и возникновению фторуглеродистых полимерных пленок, способствующих улучшению режима работы трущихся деталей.

Проведенные исследования позволили А.К. Прокопенко, Ю.С. Симакову и др. совместно с сотрудниками Средневолжского НИИ НП создать концентрат медьсодержащей присадки к индустриальным маслам "МКФ-18" для масел промышленного оборудования и машин бытового назначения (ТУ 38.401.44—84). Концентрат присадки МКФ-18 представляет собой 50%-й раствор медьсодержащего продукта в базовом масле И20А. Это однородная жидкость темно-зеленого цвета с температурой вспышки не ниже 180°C и температурой застывания не выше минус 9°C. Концентрат присадки не коррозирует по отношению к металлам. Практически не токсичен. Он не оказывает раздражающего действия на кожу и слизистые оболочки человека, не обладает сенсибилизирующим действием и кожнорезорбивными свойствами.

Как пишет А.К. Прокопенко [54], разработка и создание концентрата МКФ-18 были основаны на исследованиях, проведенных по изучению механизма ИП в компрессорах бытовых холодильников.

Триботехнические испытания по определению оптимальной концентрации присадки МКФ-18 проводились А.К. Прокопенко совместно с В.Н. Францевым и О.Р. Щекуриным на парах трения из стали марки 45 с твердостью HRC 45-46 и скорости скольжения 1,5 м/с. Удельная нагрузка на образцы была равна 18,75 МПа. В качестве базового смазочного материала использовалось индустриальное масло И20А. Концентрация присадки менялась от 0,02 до 2% по массе. В процессе испытаний поддерживали непрерывную циркуляцию смазочного материала, подаваемую в зону трения насосом.

По результатам испытаний построена зависимость интенсивности изнашивания образцов от концентрации присадки в смазочном масле (рис. 2.27).

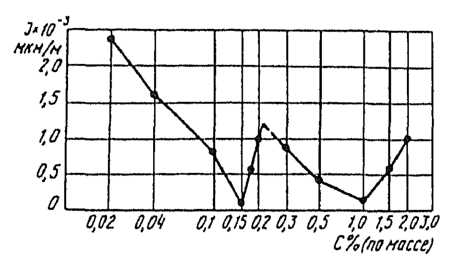


Рис. 2.27. **Зависимость интенсивности изнашивания стальных образцов от концентрации присадки МКФ-18 в смазочном масле И20**

Как видно из приведенного графика, при повышении концентрации присадки от 0,02 до 0,15% по массе интенсивность износа снижается от $2,4 \cdot 10^{-3}$ до $0,2 \cdot 10^{-3}$ мкм/м. При концентрации 0,15% по массе в ряде экспериментов был достигнут режим безызносного трения.

Данные, полученные в результате исследований, хорошо согласуются с результатами испытаний присадки № 2 на основе олеата меди. Однако при испытании присадки МКФ-18 в больших концентрациях была обнаружена вторая область оптимальных концентраций 1% по массе. В нескольких экспериментах при этой концентрации был также получен режим безызносного трения. При проведенных ранее исследованиях наличие двух зон оптимальных концентраций не было обнаружено.

При дальнейших исследованиях диапазон концентраций присадки МКФ-18 был ограничен от 0,005 до 0,3% по массе, так как при больших концентрациях могло начаться изменение физико-химических свойств базового масла.

Для полноты картины по оценке эффективности присадки МКФ-18 приведем еще два графика из работы А.К. Прокопенко. На рис.2.28 приведена зависимость изнашивания пары трения сталь—сталь от удельной нагрузки. Здесь для сравнения был испытан смазочный материал, содержащий одну из лучших противоизносных присадок, применяемых в России, ДФ-11.

При чистом масле при нагрузке на образцы выше 18,9 МПа произошел задир на трущихся поверхностях, и испытания были прекращены. Образцы, смазываемые маслом с присадками ДФ-11 и МКФ-18, выдержали нагрузки до 40,5 МПа без разрушения. Но суммарный линейный износ трущихся материалов в масле с присадкой МКФ-18 в 1,7 раза ниже, чем в масле с присадкой ДФ-11.

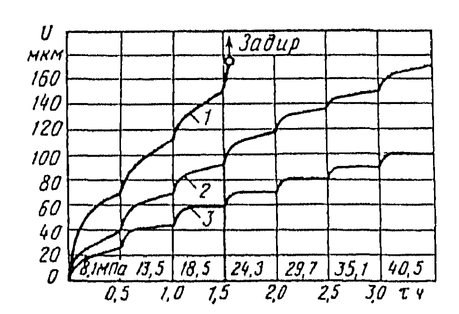


Рис. 2.28. **Зависимость характеристик изнашивания пары сталь–сталь от удельной нагрузки:**
1 – в масле И20А; *2* – в масле И20А с добавкой 1% по массе ДФ-11; *3* – в масле И20А с добавкой 0,2% по массе ИКФ-18

На рис. 2.29 приведена зависимость интенсивности изнашивания образцов от удельной нагрузки при различных скоростях

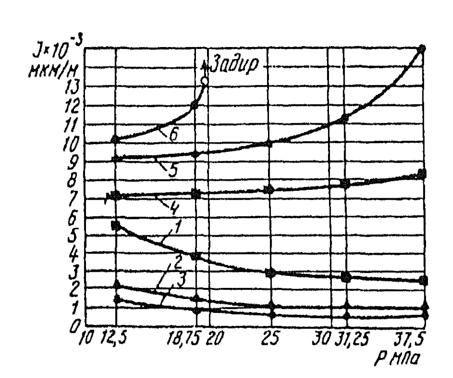


Рис.2.29. **Зависимость интенсивности изнашивания от удельной нагрузки при различных скоростях скольжения пары трения сталь 45 по стали 45:**
1 – 0,8 м/с в масле И20А с добавкой 0,2% по массе МКФ-18; *2* – 1,5 м/с в масле И20А с добавкой 0,2% по массе МКФ-18; *3* – 2,5 м/с в масле И20А с добавкой 0,2% по массе МКФ-18; *4* – 0,8 м/с в масле И20А; *5* – 1,5 м/с в масле И20А; *6* – 2,5 м/с в масле И20А

скольжения пары сталь марки 45 – сталь марки 45.

Испытания проводились по схеме ролик – колодка. Ролики имели твердость HRC 45—46, а колодка была нормализована. В качестве смазочного материала использовалось масло И20А. Масло подавалось от насоса непрерывно.

Из полученных данных видно, что для чистого масла на всех скоростях скольжения при увеличении нагрузки с 12,5 до 25 МПа интенсивность изнашивания образцов снижается и при дальнейшем увеличении нагрузки (до 37,5 МПа) остается постоянной. Это, по нашему мнению, является принципиальным различием в работе обычного и металлоплакирующего смазочного материала, что особенно важно для тяжело нагруженных узлов трения [29].

В дальнейшем на основании исследований А.К. Прокопенко предложил новый технологический процесс нанесения металлических покрытий на стальные детали, аналогичный процессу омеднения в компрессорах бытовых холодильников.

Формирование защитной антифрикционной металлической пленки происходит в результате физико-химических процессов, протекающих между рабочей средой и обрабатываемой деталью при механической активации инструментом поверхности трения. Причем активация поверхности может производиться неметаллическим инструментом (например, резиновым). Необходимые нагрузки при этом на два порядка меньше, чем при фрикционном латунировании, и составляют 0,5...1 МПа. Скорость может быть увеличена до 5 м/с. Этот своеобразный способ ФАБО с использованием металлосодержащих рабочих сред позволяет получить металлические покрытия с регулируемой толщиной на деталях различной конфигурации.

Исследования показали целесообразность нанесения таким методом покрытий на детали компрессоров бытовых холодильников перед сборкой. Нанесение медных покрытий на поршень и коленчатый вал компрессора холодильника позволяет сократить время обкатки компрессора холодильника после ремонта в 3...4 раза и, по данным Саратовского политехнического института (В.Г. Куранов), повысить износостойкость деталей в период их приработки в 1,6...2,1 раза.

Фрикционной обработке могут быть подвергнуты валы подшипников скольжения обувных и швейных машин, рабочие цилиндры и пуансоны гидравлических прессов различного назначения, направляющие стан-

ков, детали трикотажных машин и др. Металлосодержащая рабочая среда может быть использована для формирования защитной пленки непосредственно в собранном узле, детали которого трудно разобрать или если узел представляет собой неразборную конструкцию (например, подшипник качения).

В этом случае узел промывают бензином и после сушки в него закладывают рабочую среду. Детали узла приводятся в движение, и через 100...1000 циклов (в зависимости от усилия поджатия деталей) на поверхностях образуется металлическая пленка толщиной 1...3 мкм. Затем узел промывают водой, ацетоном и бензином, сушат и смазывают маслом.

Узлы трения швейных и обувных машин изготовляют из термообработанных сталей и чугуна и смазывают маловязкими минеральными маслами. Условия работы машин не позволяют обильно смазывать трущиеся детали, так как это вызывает загрязнение изделий. Поэтому чаще всего применяют периодическое смазывание. На фабриках индивидуального пошива одежды и обуви смазывание производят один раз в конце смены.

Тяжелые режимы работы (знакопеременные циклические нагрузки и ограниченное количество смазочного материала) приводят к повышенному износу трущихся деталей и преждевременному выходу машин из строя. Наибольшему износу подвергаются трущиеся детали челночного устройства: изнашивается направляющий паз челнока и поясок шпуледержателя. Через 3...4 месяца работы челночное устройство полностью выходит из строя в результате износа. Эффективной мерой борьбы с износом в этом случае является применение жидких смазочных материалов, реализующих при трении ИП. Таким смазочным материалом является масло с металлоплакирующей присадкой, разработанное Средневолжским НИИ НП и Пензенским государственным университетом при участии А.К. Прокопенко.

При изучении механизма проявления избирательного переноса в узлах трения машин и аппаратов бытовой техники А.К. Прокопенко с сотрудниками были разработаны новые приборы и устройства [59, 64]:

— прибор для триботехнических испытаний при возвратно-поступательном движении образцов;

— прибор для триботехнических испытаний в маслофреоновых смесях при вращательном движении образцов;

— прибор для триботехнических испытаний материалов в контролируемых средах;

— устройство для непрерывной регистрации суммарного линейного износа контактируемых образцов.

За разработку, исследование и внедрение методов повышения срока службы машин, технологического оборудования и транспортных средств предприятий бытового обслуживания на основе безызносности А.К. Прокопенко, его последователям и ученикам в 1990 г. была присуждена государственная премия Совета Министров Российской Федерации.

6. Насосное машиностроение

В этом разделе изложены результаты работ по созданию высокоизносостойких и надежных эластичный уплотнений, реализующих при трении режим ИП, и используемых в различных типах насосов.

Эластичные уплотнительные устройства в подвижных соединениях машин, оборудования и приборов применяют на протяжении многих лет. Современная техника предъявляет к уплотнениям все более высокие требования: повышаются нагрузки, скорости скольжения и температуры, расширяется ассортимент сред, в контакте с которыми работают уплотнения. Так, уплотнения грунтовых и буровых насосов работают при давлениях 30, а иногда и 50 МПа. Перекачиваемая вода таких насосов, как правило, имеет большое содержание твердых частиц (до 30% по объему). Традиционные уплотнительные материалы (резиновые, хлопчатобумажные, асбестовые и др.) не выдерживают подобных условий работы и быстро выходят из строя в результате износа трущихся поверхностей, потери упругих свойств и общей деградации.

В связи с этим возникла необходимость создания для уплотнений таких полимерных материалов, которые соответствовали бы комплексу триботехнических требований: в процессе трения структура материала должна трансформироваться таким образом, чтобы наряду с распадом больших молекул формировались более устойчивые к трению структуры, с образованием сервовитной пленки и серфинг-пленки.

Эта идея легла в основу работ, выполненных в ВНИИТнасосмаше (г. Казань) под руководством Л.А. Кольцова [32, 35].

Работа к.т.н. Л.А. Кольцова

Цель исследований – реализовать процесс ИП при трении полиуретановых уплотнений при работе со стальной поверхностью с формированием из образующихся радикалов более устойчивых полимерных структур в поверхностном слое.

По мнению Л.А. Кольцова, для реализации ИП при трении полимер должен иметь низкий коэффициент трения при заданных условиях работы *(p, v, T)*, быть эластичным (обеспечивать восстановление деформации поверхностного слоя), иметь минимальное время релаксации в диапазоне эксплуатационных температур, содержать антифрикционные твердые наполнители.

Исходя из этих требований для манжетных уплотнений были разработаны композиционные полиуретаны, включающие: уретановый сополимер, температура деструкции которого на 40...50°С выше температуры деструкции известных полиуретанов; антифрикционный наполнитель, содержащий порошкообразные медь, графит, дисульфид молибдена, нитрид бора; сшивающий агент. В качестве сшивающих агентов для полиуретанов применяют диамины, которые образуют трехмерную сетку.

Порошок меди, введенный в состав полиуретана, придает этому материалу темно-коричневый цвет. При добавке в материал порошка меди

стальной сопряженный вал перестает изнашиваться. На его поверхности образуется сервовитная пленка меди, которая и предохраняет вал от износа и снижает коэффициент трения [34].

В зависимости от условий эксплуатации пар трения в композиционные полиуретановые системы были введены специальные легирующие добавки и присадки. Для уплотнений, работающих в контакте с водой, присадки должны придать полимеру гидрофобные свойства, чтобы исключить поглощение ими воды. Такими присадками для полиуретанов являются низкомолекулярные полиорганосилоксановые жидкости типа ПМС, ОКД, ПМФС, которые кроме гидрофобизации повышают термостойкость полиуретанов, снижают коэффициент трения (следовательно, и температуру на контакте), улучшают антикоррозионные свойства. Структура материала в этом случае благоприятствует образованию и сохранению сервовитной медной пленки на контактной поверхности пары трения.

Иногда к трущимся парам предъявляют такие требования, которым не удовлетворяет ни один из существующих полимерных материалов. Подобные задачи решают путем использования системы из двух или более полимеров, свойства которых в комплексе обеспечивают требуемые свойства.

Технология получения полиуретанов, работающих в режиме избирательного переноса, достаточно подробно изложена в работе [33].

Промышленные испытания уплотнений из композиционных полиуретанов, работающих в режиме ИП, показали, что их эффективность значительно выше эффективности традиционных уплотнений. Так, уплотнения вала грунтового насоса Гр 400/40 из композиционного полиуретана, работающего в режиме ИП, имели срок службы 3200 ч, а графитизированные хлопчатобумажные уплотнения ХБН, работающие в таких же условиях, не более 400 ч. Насосы работали на перекачке песков второй стадии дешламации, плотность пульпы 1245...1450 кг/м^2 с широким диапазоном гранулометрического состава. На протяжении всего периода работы уплотнения не нагревались.

При перекачке соляной пульпы полиуретановые уплотнения насосных установок работают до 300 ч, а уплотнения ХБН на некоторых объектах приходилось заменять ежедневно.

В буровых насосах БРН-1, У8-6М полиуретановые уплотнения штоков имеют срок службы в 5 раз больший, чем уплотнения из лучших сортов резин. Важно, что в результате реализации ИП очень мало изнашиваются штоки, это дает большую экономию специальных марганцовистых и никелевых сталей.

Для увеличения отдачи нефтяного пласта в объединении "Татнефть" в пласт закачивают различные кислоты. Однако это резко снижает срок службы резиновых деталей насосных агрегатов ЧАН-700, ЦА-320. Резиновые детали работают 7...13 ч, процесс же перекачки непрерывный и длится 20...25 ч. Испытания уплотнений из композиционных полиуретанов, работающих в режиме ИП, на агрегате ЧАН-700, перекачивающем серную кислоту концентрацией до 70% под давлением до МПа при тем-

пературе 20...25°C, показали, что стойкость уплотнений в 3...5 раз выше, чем уплотнений лучших сортов резин, в том числе резин на основе фторкаучука. Следует иметь в виду, что композиционный полиуретан содержит до 20% (по массе) порошкообразного ПТФЭ, введенного на стадии образования фторполимера.

Результаты испытаний, проведенных во ВНИИТнасосмаше, открывают большие возможности использования полиуретанов в совокупности с кислотостойкими полимерами для изготовления эластичных деталей узлов трения, находящихся в непосредственном контакте с минеральными кислотами.

Другим не менее важным направлением использования композиционного полиуретана является применение его для футеровки корпусных деталей насосов. Футеровку изготовляли в металлических формах; уретановый фторполимер в жидкофазном состоянии заливали в формы и отверждали при температуре 120°C в течение 2 ч. Вкладные футеровки корпуса насоса ЗПВР-6 используют для перекачки гидросмеси плотностью до 1300 кг/ $м^3$, pH = 6...8 с температурой до 60°C.

Накоплен значительный опыт использования полиуретановых футеровок корпусов насосов, перекачивающих высокоабразивную пульпу, состоящую из извести, чугунной дроби диаметром 1...2 мм и кварцевого песка плотностью 2,2 т/м. По сравнению с резиновыми полиуретановые футеровки служат в 2...3 раза дольше.

Успешно используют полиуретан и для перекачки щелочной гидроабразивной пульпы. Однако известно, что полиуретаны значительно менее стойки к щелочам, чем обычные резины. По мнению Л.А. Кольцова, механизм взаимодействия перекачиваемой насосом среды и полиуретана в данном случае чрезвычайно сложен и не может быть объяснен только механической теорией изнашивания.

Срок службы быстроизнашивающихся деталей насосов (рабочих колес, корпусов, уплотнений) можно также повысить путем нанесения на них композиционных жидких покрытий, полученных на основе полиуретанов и специальных антифрикционных наполнителей, обеспечивающих ИП при трении.

Во ВНИИТнасосмаше разработан ряд таких покрытий; они могут быть нанесены на рабочие органы насосов обычными способами (напылением, погружением, литьевым способом) с последующей сушкой при нормальной температуре. Покрытия имеют хорошую сцепляемость с чугуном, сталью, резиной, кордом, что обеспечивает широкую область применения.

Приведем некоторые примеры использования покрытий в насосах. В Средней Азии эксплуатировались центробежные насосы ЭЦВ 10-160-35, ЭЦВ 12-255-30 и ЭЦВ 12-375-30; рабочие колеса одних насосов имели композиционное покрытие из полиуретана, а других насосов — пенопластовое покрытие. Последнее в процессе работы насоса растрескивалось и отслаивалось. Полиуретановое покрытие срабатывалось равномерно до полного износа; при многократном его нанесении можно повысить срок службы рабочих колес до полного износа насоса.

Рабочие колеса насосов ЭК-6 и ВК-2 для перекачки воды с температурой до 100°С, содержащей до 5% (по объему) песка, покрыты композиционным полиуретаном. Срок службы лопасти колеса при повторных покрытиях повышается до срока службы ступицы.

Существенное (в 3...5 раз) повышение срока службы рабочих колес насоса ЭК-6 при покрытии их композиционным полиуретаном получено на подаче воды, питающей котельные и тепловые сети. Поскольку обычно котельные и тепловые сети не имеют мастерских, способных ремонтировать и изготовлять рабочие колеса, срок службы последних определяет срок службы насоса.

Износо- и термостойкие резины. Большой практический интерес в плане рассматриваемого вопроса представляют резины на основе совмещенных полиуретанового и дивинилнетрильных каучуков, работающие в режиме ИП. Такие резины обладают комплексом положительных свойств: повышенными, по сравнению с обычными резинами, износостойкостью и прочностью, масло-, бензино- и нефтестойкостью, устойчивостью к низким и повышенным температурам.

В компоненты резиновой смеси входят: дивинилнитрильный каучук, сополимер СПУ-1, содержащий медь, углерод технический (сажа ДГ-100), каптакс (ускоритель вулканизации), противостарители, в состав которых входит параоксионезон, сантофлекс УР, дибутилфталат, стеарин, окись цинка, сера [34].

Уплотнения из указанных резин, работающие в режиме ИП, прошли промышленные испытания в компрессоре РСК-50/6. Условия испытаний: температура 150...160°С, перекачиваемая среда – дивинил и другие углеводороды, частота вращения 490 мин. Срок службы уплотнения в 15... 20 раз выше, чем уплотнений из обычных резин.

Уплотнения стального вала гидромуфт из новых резин показали исключительно высокую работоспособность при следующих условиях: температура 100...120°С, перекачиваемая среда – масло турбинное 30, частота вращения 1500 мин. Такие резины могут найти широкое использование в народном хозяйстве.

На основе полученных Л. А. Кольцовым результатов исследования можно утверждать, что композиционные полиуретаны способны работать в режиме ИП. Применение таких полиуретанов при изготовлении деталей машин, оборудования и приборов различного назначения повышает срок службы уплотнений в 3...5, а в некоторых случаях в десятки раз [34].

7. Металлообрабатывающее оборудование

Работа к.т.н. В.Н. Дзегиленка

В течение нескольких лет В.Н. Дзегиленком проводилась работа по снижению шума, повышению износостойкости пар трения, снижению усилий перемещения подвижных органов металлорежущих станков, уменьшению утечек в гидропередачах, а также повышению стойкости металлорежущего инструмента [21].

В процессе выполнения работ были проанализированы материалы по долговечности металлообрабатывающего оборудования 200 предприятий, из них на 156 была выявлена необходимость проведения работ по повышению износостойкости узлов трения станков и механизмов с использованием избирательного переноса.

Анализ номенклатуры деталей и узлов станков позволил выявить целесообразность применения эффекта безызносности для следующих видов пар трения (табл. 2.4).

Таблица 2.4

№ п/п	Вид соединения	Получаемый эффект от применения новых методов	Способы достижения эффекта
1.	Зубчатые передачи	Сокращение времени обкатки и приработки. Снижение уровня звукового давления	Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) + металлоплакирующая смазка передачи
2.	Направляющие станин и подвижных органов станков	Ликвидация скачков. Снижение усилий на перемещение подвижных органов	ФАБО поверхностей с применением смазочных материалов, содержащих ПАВ
3.	Аксиально-поршневые насосы, гидроприводы	Повышение износостойкости пар трения втулка–поршень. Экономия цветных металлов	Замена пар трения цветной металл–сталь на сталь–сталь+ФАБО+металлоплакирующая присадка к маслу
4.	Винтовые передачи	Устранение заедания. Плавность и снижение усилий перемещения деталей	ФАБО+металлоплакирующая присадка к маслу
5.	Подшипники скольжения	Повышение износостойкости пары вал–втулка. Экономия цвет. металлов	Замена пар трения из цвет. металл—сталь на сталь—сталь + ФАБО + металлопл. присадка к маслу
6.	Металлорежущий инструмент	Повышение стойкости инструмента, ужесточение режимов резания	Введение в смазочно-охлаждающую жидкость металлоплакирующей присадки.

На ряде заводов были выполнены с положительным эффектом работы по реализации режима эффекта безызносности (Талдомский опытно-экспериментальный завод, Вильнюсский станкозавод "Жальгерис", Псковский завод зубчатых колес, Егорьевский станкозавод, Дмитровский завод фрезерных станков, Московский завод гидроприводов и др.).

При проведении указанных работ были отработаны технологические процессы ФАБО, разработаны соответствующие составы технологических жидкостей, а также методы контроля. Кроме того, были изготов-

лены вспомогательное оборудование и устройства (оправки, нагружающие устройства, дозаторы и др.) для проведения ФАБО деталей.

Ниже приводятся результаты проведенных работ.

1. Снижение усилий страгивания и перемещения по направляющим в узле "стол-станина" на 20...40% (продольно-строгальные станки Р- 6000, 7210, 7212 Сасовского станкозавода; станки мод. 52А50 и 53А80 Егорьевского завода).

2. Уменьшение утечек и повышение ресурса работы гидроприводов и гидросистем в 1,5...2 раза (гидроприводы Московского завода гидроприводов, завода "Зенит" г. Вилейка, Барнаульского завода транспортного машиностроения и др.).

3. Повышение стойкости металлорежущего инструмента и качества обработки поверхности в 2...5 раз (Вилейский завод "Зенит", завод "Знамя революции" и др.).

4. Повышение технико-эксплуатационных характеристик оборудования, сохранение класса точности обработки (ДЭМЗ, Горьковское СПО, завод "Зенит" г. Вилейка и др.).

5. Снижение коэффициента трения у подшипников скольжения шпинделей на 30%, а также подшипников электрических двигателей различных типов (Рязанское СПО, НПО "Псковэлектромаш" и др.).

6. Снижение уровня звукового давления приведено в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Завод	Объект испытаний	Исходный уровень шума	Мероприятия ФАБО+ присадка	Уровень шума после обработки
Ейский станкозавод	Коробка скоростей станка 1Е713	81,1	+ +	79,4
Ивановский станкозавод	Передняя бабка станка № 64 мод. ИТ-1М	88,7	+ +	87,1
Горьковское СПО	Коробка скоростей станка 6Т83Ш	82,0	+ —	77,4
Псковский завод зубчатых колес	Мотор-редуктор № 3109 № МЦ2С-80-112	88,5	+ +	82,2
	№ 3142	84,5	+ +	77,9

В результате проведенной работы В.Н. Дзегиленок считает, что применение избирательного переноса в станкостроении позволяет обеспечить:

— снижение энергоемкости станков на 10...20%;

— увеличение срока сохранения класса точности в 1,5...3 раза;

— повышение стойкости инструмента в 2...5 раз;

— увеличение срока межремонтного периода в 1,5 раза;

— повышение виброакустических характеристик, снижение времени обкатки;

— повышение плавности перемещения рабочих органов;
— снижение усилий перемещения рабочих органов на 20...40%;
— экономию цветных металлов.

8. Тяжелое машиностроение

Узлы трения крупногабаритных машин часто испытывают большие ударные нагрузки, недостаточное поступление смазочного материала, особенно в начальный период работы, действие абразивных частиц, низкие температуры окружающей среды, высокую влажность, вибрацию и другие неблагоприятные факторы, которые снижают долговечность трущихся деталей. Замена в процессе эксплуатации изношенных узлов трения крупногабаритных машин требует больших материальных затрат и приносит значительные убытки от простоев машины. В связи с этим на Уралмаше при проектировании узлов трения тяжелого оборудования и крупногабаритных машин уделяется серьезное внимание процессам приработки деталей, улучшению условий смазывания поверхностей трения и выбору высококачественных смазочных материалов.

Специалисты по вопросам надежности трущихся деталей к.т.н. В. М. Бондюгин и В.В. Быченков провели обширные работы по испытанию тяжелонагруженных узлов трения с применением металлоплакирующих присадок к маслам. Испытанию подвергались редукторы карьерных и шагающих экскаваторов, бурового оборудования, а также узлы трения технологического оборудования завода Уралмаш и других предприятий страны (коробки скоростей термопластавтоматов, гидродинамические подшипники, насосы) [4].

Работа к.т.н. В.М. Бондюгина и В. В. Быченкова

В течение длительного времени указанные авторы проводили испытания по использованию эффекта безызносности на оборудовании, изготавливаемом на Уралмашзаводе и других фирм. Объекты, место испытаний, а также условия и результаты испытаний сведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Результаты испытаний тяжелонагруженных узлов трения с применением металлоплакирующих присадок

Объекты и место испытаний	Условия и результаты испытаний
Редукторы карьерных экскаваторов ЭКГ-20	Удельные нагрузки от 870 до 1550 МПа; 1 масс % присадки МКФ-18 У в масле ТАП-15 В
Разрез Нерюнгринский ПО "Якутуголь"	1. Визуальное наблюдаемое медное покрытие на зубьях 1-й и 2-й ступеней редуктора подъемной леки. По мере накопления абразивных частиц в масле покрытие исчезало и снова восстанавливалось при заливке в редуктор свежего масла с присадкой.

Продолжение табл. 2.6

Объекты и место испытаний	Условия и результаты испытаний
	2. Более качественная приработка зубчатых передач в начальный период эксплуатации.
Редукторы карьерных экскаваторов ЭКГ-20А	Удельные нагрузки от 700 до 2130 МПа; 2 масс % МКФ-18У в масле ТАП-15В
Разрез Красногорский концерна Кузбассразрезуголь	1. Блокирование развития процесса усталостного выкрашивания передач ходовых и бортовых редукторов, предотвращение аварийного износа передач с краевыми дефектами зацеплений и продление срока службы до капитального ремонта. 2. Экономия смазочных материалов в 2 раза, улучшение адгезионных и адсорбционных свойств масла.
Редукторы шагающих экскаваторов ЭШ-20/90. Разрез Назаровский ПО Красноярскуголь	Удельные нагрузки от 320 до 1060 МПа; 1 масс % МКФ-18У в масле И-50. 1. Безаварийная эксплуатационная приработка зубчатых передач. 2. При концентрации абразивных частиц в масле (0,3...0,5). 0,01 масс % снижение скорости изнашивания по массе в 2,5 раза. 3. При концентрации абразивных частиц более 0,03 масс % эффект увеличения износостойкости зубчатых передач не проявляется.
5-валковый каландр фирмы "Bersdorf" Уральское ПО "Пластик"	Удельные нагрузки 0,4...1,5 МПа; скорости скольжения в подшипниках с 0,3 до 0,5 м/с; 0,5 масс. % МКФ-18У в масле МС-20. 1. На стальных поверхностях шеек валков обнаружено тонкое медное покрытие. 2. Снижение расхода электроэнергии в 1,8...2,0 раза; уменьшение коэффициента трения скольжения в подшипниках с 0,12 до 0,04; увеличение ресурса бронзовых вкладышей опор наиболее нагруженных валков в 5...6 раз. Снижение температуры масла на выходе из подшипника с 83 до 72°С.
Коробки скоростей пластавтоматов KuASY 5000/630 (ГДР) ПО "Уралмаш"	Зубчатые передачи с объемной закалкой до твердости HRC = 44...48; 0,5 масс. % МКФ-18У в масле И-40А. Продление срока службы аварийно изношенных зубчатых передач на 3 года; снижение шумности на 15%, вибрации на 25%; "залечивание" мелких питтингов.
Гидродинамические подшипники скольжения и быстроходные зубчатые передачи с зацеплением Новикова. Газоперекачивающая станция "Аганская" типа КС-3 ПО "Сургутнефтегаз"	Окружная скорость цапф 39–42 м/с; удельные давления от 0,4 до 1,2 МПа; 0,8 масс. % МКФ-18У в масле ТКП-22. 1. Увеличение ресурса зубчатой передачи в 2,6 раза. 2. Предотвращение развития процессов усталостного выкрашивания зубьев, снижение температуры масла в подшипниках.

Авторы работы использовали металлоплакирующую присадку МКФ-18У для легирования гидромасел отечественного производства в гидросистемах обрабатывающих центров "Тошиба" и "Шарман" ОАО "Уралмаш", а также технологического оборудования Челябинского трубопрокатного завода.

В результате испытаний выявлена устойчивая тенденция к полному или частичному восстановлению или стабилизации утраченных в процессе эксплуатации служебных характеристик лопастных и радиально-поршневых гидронасосов:

— увеличение предельного давления в гидросистемах с 50...60 до 95...100% паспортного значения;

— снижение температуры масла на 10...15%;

— увеличение ресурса гидронасосов в 2,5 раза.

Применение легированных гидромасел позволяет исключить аварийное изнашивание элементов гидропривода в начальный период эксплуатации, улучшить качество масел, эксплуатировать импортное технологическое оборудование на маслах российского производства.

С целью оценки влияния количества абразивных частиц на эффективность смазочного действия металлоплакирующей присадки МКФ-18У была проведена подконтрольная эксплуатация редукторов поворота двух шагающих экскаваторов ЭШ 20/90 с применением масла И-50, легированного присадкой МКФ-18У. Контролировалась концентрация Cu, Fe, SiO_2 путем периодического пробоотбора и элементного анализа масла. Интенсивность изнашивания зубчатых передач по массе оценивалась по скорости накопления Fe в системе централизованной смазки редукторов.

Результаты эксплуатационной проверки показали, что противоизносная эффективность присадки МКФ-18 снижается с ростом загрязненности масла абразивными частицами. При концентрации SiO_2 (0,3...0,5) $\cdot 10^{-2}$ масс. % скорость изнашивания зубчатых передач по массе при введении в масло 0,5 масс.% МКФ-18У снижается с 0,22 до 0,09 г Fe в сутки. При увеличении концентрации SiO_2 до $3 \cdot 10^{-2}$ масс. % скорость расхода связанной меди в присадке практически равна скорости изнашивания основного металла и составляет 1,1 г в сутки. При этих условиях легированная смазка неэффективна из-за высокой скорости расхода активного компонента присадки и интенсивного изнашивания металлоплакирующей пленки.

Авторы работы установили возможность ускорения приработки тяжелонагруженных зубчатых передач. Испытывался редуктор серийного бурового насоса УНБ-600А. При технологической обкатке в состав масла И-50 вводились 1,5 масс. % МКФ-18У и 20 масс. % консервирующей присадки "АКОР-1". При передаче расчетной нагрузки зацеплением контактные напряжения равны 417 МПа; скорость качения в зацеплении – 5,2 м/с; максимальная скорость скольжения на головке зуба равна 0,42 м/с, а на ножке зуба – 0,51 м/с. Приработка проводилась на технологическом стенде под нагрузкой от 20 до 100% от номинальной.

Использование присадки МКФ-18У позволило сократить время приработки в 2 раза, снизить среднюю шероховатость поверхности в пятне контакта с Rz = 42 мкм до Rz = 5,1 мкм, минимальную шероховатость – с Rz =35,8 мкм до Rz = 1,4 мкм. Способ приработки был внедрен в ОАО "Уралмаш" [4].

9. Железнодорожный транспорт

Известно, что во многих промышленных странах ведутся работы по повышению срока службы трущейся пары колесо – рельс. В последние годы эта проблема весьма обострилась в России. По литературным данным в России [3, 26] ресурс работы рельсов вследствие износа за период с 1985 по 1998 г. на некоторых дорогах снизился в 3...10 раз, а на ряде кривых участков дороги даже в 30 раз. Износ колесных пар подвижного состава увеличился в 10...15 раз.

С целью уменьшения износа колесных пар и рельсов делаются попытки применить различные смазочные материалы, покрытия, изменить соотношение твердостей контактируемых деталей и др. Однако работы проводятся без достаточной лабораторной проверки, учета физико-химических процессов, происходящих в контактной зоне, действия эффекта Ребиндера и, что самое главное, без рассмотрения всех возможных видов изнашивания пары трения колесо – рельс.

Отметим, что взаимодействие колеса с рельсом имеет принципиальную разницу от взаимодействия обычных тяжелонагруженных трущихся деталей в условиях трения качения с проскальзыванием. Здесь смазочный материал в результате трения колеса о рельс на грани резания может не только снизить износ, но и увеличить его (см. раздел 3 главы "Метод испытания материала на повторную пластическую деформацию поверхностного слоя").

Научно-исследовательские работы, направленные на разработку методов повышения износостойкости колесо – рельс, должны предусматривать определение следующих характеристик трущихся пар:

— способности сопротивляться материалов пары трения или покрытия повторной пластической деформации в условиях, близких к условиям работы колесо – рельс. Идентичность таких испытаний должна оцениваться по величине, форме и составу продуктов износа, полученных при лабораторных испытаниях и реальных продуктов износа, собранных на полотне железной дороги сразу же после прохождения поезда;

— влияния различных смазочных материалов на работу пары трения в условиях, близких к условиям работы пары колесо–рельс при различной степени пластической и упругой деформаций поверхностного слоя деталей;

— оценки действия водорода, образующегося в процессе работы колеса – рельс, на износостойкость колесных пар;

— определение соотношения твердости материалов колеса и рельса на долговечность пары колесо – рельс.

Отмеченные исследования возможно провести на установке, описанной нами на с. 520.К работе должны быть привлечены специалисты по трению и износу, знакомые с контактной прочностью, водородным изнашиванием, металлоплакирующими смазочными материалами и новыми способами нанесения фрикционных покрытий на стальные поверхности.

Небольшой коллектив специалистов из Корпорации "СПЛАВ-ЛДТ" сумел получить весьма обнадеживающие результаты по повышению ходимости колесных пар методом финишной антифрикционной безабразивной обработки их поверхностей катания. Работа проводилась в России, Германии, Латвии и Армении.

9.1. Работа д.т.н. В.И. Балабанова и С.М. Мамыкина

Применение ФАБО поверхностей катания колес.

Предварительно заметим весьма любопытное мнение С.М. Мамыкина и В.И. Балабанова о причине резкого скачка в снижении износа колесных пар в последние годы в России. Они считают, что при переходе железнодорожного транспорта с подшипников скольжения на подшипники качения изменилось состояние контактных поверхностей рельсов.

При эксплуатации подшипников скольжения железнодорожное полотно было всегда обильно покрыто смазкой, вытекающей из букс подшипников. Железнодорожный персонал тщательно смазывал буксы, предупреждая их перегрев, который нередко грозил тяжелыми последствиями. Расход смазочных материалов был велик. Смазка, вытекающая из букс, содержала большое количество продуктов износа антифрикционного слоя и была насыщена не только частицами меди, свинца и олова, но и содержала комплексные соединения этих металлов. Все это служило защитой проникновению водорода в поверхности трения как колеса, так и рельса.

После перехода с подшипников скольжения на подшипники качения, что, безусловно, является прогрессивным фактором, поверхности качения колеса не стали смазываться вытекающей из букс смазкой. Это обстоятельство усилило водородный износ колес и рельсов, особенно гребня колеса, поверхности которого испытывают более значительные нагрузки от проскальзывания.

Учитывая вышеизложенное, авторы провели исследование состояния поверхностей трения колес при их выбраковке. Установлено, что в ряде депо Московской железной дороги колесные пары в основном бракуются в результате износа гребня, изменения его геометрии (остроконечный накат), а также появления сколов, выщербин и др. При этом фактический пробег колесной пары в среднем составляет 60...80 тыс. км [2].

Статистика подтвердила, что увеличение интенсивности износа колесных пар и появление выщербин наблюдается в основном в осенне-весенний период, когда чаще выпадают осадки и повышается влажность воздуха, что естественно усиливает водородное изнашивание.

Исходя из анализа повреждения колесных пар и учитывая процессы, связанные с протеканием водородного изнашивания (см. главу 6 часть 1) авторы пришли к выводу о возможном снижения износа колесных пар путем их фрикционного латунирования (метод ФАБО) [2].

Процесс ФАБО защищает стальные поверхности от проникновения водорода и придает им антифрикционные свойства.

Эксплуатационные испытания опытных колесных пар, обработанных по технологии ФАБО, полувагонов с осевой нагрузкой 27 т на экспе-

риментальном кольце на станции Щербинка выявили снижение интенсивности износа на 39% по сравнению с серийными колесными парами при пробеге около 70 тыс. км (рис. 2.30).

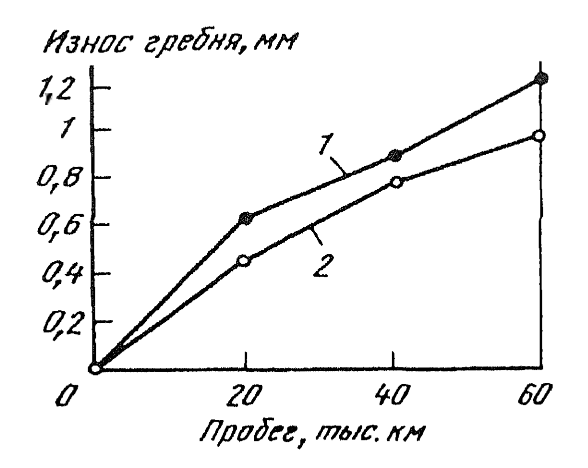


Рис. 2.30. **Сравнительные данные испытаний по износу гребней:**
1 – стандартных колесных пар; *2* – обработанных по технологии ФАБО

Опытные колесные пары, прошедшие обработку по технологии ФАБО, в процессе эксплуатационных испытаний в поезде № 64 Москва – Лениногорск обеспечили пробег колесных пар более 200 тыс. км, что более чем в 3 раза превышает на данном маршруте пробег колесных пар после обычной переточки.

Авторы работы провели обработку 8 колесных пар на одном транспортном предприятии Германии. К настоящему времени опытные колесные пары имеют пробег более 280 тыс. км. Обмер колесных пар после пробега 150 тыс. км показал весьма низкую интенсивность изнашивания. По мнению немецких специалистов, колеса при такой интенсивности изнашивания экспериментальные колеса могут пробежать до 1 млн км.

В.И. Балабанов, С.М. Мамыкин, Ю.А. Хрусталев и Б.Ф. Ляхов провели исследование содержания водорода в стружке, полученной при обточке колес и в продуктах износа в зависимости от их массы [3] .

Водород определяли на аналитической установке Института физической химии РАН вакуумно-десорбционным методом при нагревании до 400°С и остаточном давлении $2{,}6 \cdot 10^{-4}$ ПА ($2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.). Температура 400°С выбрана на основании предварительных исследований, которые показали, что в таких условиях из металлического образца практически полностью удаляется диффузионно-подвижный водород. При этой температуре не выделяется "биографический" водород, который образовался в стали в процессе ее выплавки. Количество водорода измеряли в $см^3$ на 100 г металла.

Испытания проводились с использованием стружки (1...3 г) с поверхности катания колесной пары после ее обточки на колесотокарном станке. Исследовались три вида стружки: с поверхности катания обычного колеса после эксплуатации (1); с поверхности катания колеса после обработки методом ФАБО и 203 тыс. км пробега (2); с гребня колеса после обработки ФАБО и пробега колеса 293 тыс. км пробега (3).

Полученные данные сведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Количество водорода, выделившегося из стружки при термодеструкции

Вид стружки	1	2	3
Количество водорода, см^3/100 г	1	0,74	0,54

Как видно из полученных данных, обработка ФАБО почти в 2 раза снижает способность к насыщению водородом гребня колеса и на 25% его поверхности катания по сравнению с обычным необработанным колесом.

Исследовались также частицы износа разной толщины, отделившиеся с поверхности катания колесной пары в виде различного вида плоских чешуек и фрагментов металла, которые выпали из выщербин колесных пар, не прошедших обработку по технологии ФАБО (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Содержание водорода в частицах износа в зависимости от их толщины

Номер измерения	Толщина, мм	Масса, г	Содержание водорода, см^3/100 г
1	2,8—3,2	3,26	1,5
2	2,8—3,2	2,33	1,77
3	2,8—3,2	1,65	1,76
4	1,8—2,2	0,55	2,45
5	1,8—2,2	0,51	2,65
6	0,8—1	0,17	6,1
7	0,8—1	0,19	5

Из приведенных данных следует, что в верхних слоях материала цельнокатаного колеса содержание водорода значительно больше, чем в более глубоких, что приводит к водородному износу. Полученные результаты убеждают в целесообразности применения ФАБО как средства снижения износа колесной пары.

Испытания колесных пар обработанных ФАБО в Латвии. Н. Н. Козловский из фирмы "Балт-Мобил" провел испытания 7 колесных пар, обработанных по технологии ФАБО на Латвийской железной дороге на маневровых локомотивах ЧМЭ-3, работающих на одном из наиболее неблагоприятных по износу гребней колесных пар участке Мангали (табл. 2.9).

Таблица 2.9

Сравнительные испытания обработанных и необработанных колесных пар

Показатель	Необработанные, мм	Обработанные, мм
1. Максимальный износ гребней	5,0	1,3
2. Максимальная разница износа между левым и правым колесом	3,7	0,6
3. Суммарный износ всех колес	20,7	5,3

9.2. Применение металлоплакирующей смазки в паре "колесо–рельс"

С целью снижения интенсивности изнашивания рельсов и колесных пар в последнее время стали применять принудительную лубрикацию пары "колесо–рельс" обычными жидкими смазками, содержащими большое количество ПАВ.

Такая работа должна была сопровождаться проведением теоретико-экспериментальным анализом возможных последствий с точки зрения проявления эффекта Ребиндера и водородного изнашивания металлов.

Наличие на поверхностях пары трения "колесо–рельс" водородсодержащих материалов (снега, воды и смазки) в процессе контактирования приводит к их деструкции до атомарного водорода и диффузии последнего в поверхности трения. В результате этого происходят обезуглероживание поверхности, изменение микрообъемов, образование микротрещин и другие негативные последствия. Наиболее опасно взрывное сгорание в микроколлекторах (порах) метана (CH_4), образовавшегося в процессе обезуглероживания (дизельный эффект) [68] с образованием каверн, раковин, кратеров, которые на железной дороге получили наименование "выщербин". Особенно интенсивно, как отмечалось ранее, эти процессы протекают в осенне-весенний период, когда на рельсовом полотне наблюдается высокое содержание влаги.

Наряду с заявлениями разработчиков о положительных результатах применения смазок на железнодорожном транспорте, имеется комплекс нерешенных серьезнейших проблем в этом вопросе. Например, железные дороги США по данным Ассоциации американских железных дорог (ААЖД) ежегодно теряют 80 млн долл. вследствие неэффективности процесса смазывания рельсов [75]. При этом "...некоторые железные дороги обнаружили, что системы смазывания, защищая колеса, неблагоприятно влияют на рельсы" [74]. Отмечается, что жидкая составляющая смазки, попадая в микротрещины, способствует их развитию и образованию контактно-усталостных дефектов. Поэтому лубрикация должна продлевать срок службы рельсов до того момента, пока контактно-усталостные дефекты не начнут проявляться и не станут определяющим фактором. Указывается также, что чрезмерное смазывание и большая разница в уровне смазывания может приводить к расстройствам пути и возможному сходу колеса с рельса [74].

Исследования, проведенные во Франции Национальным обществом железных дорог, показали, что лубрикация не устраняет возникновение и развитие трещин в зоне контакта колеса с рельсом, а приводит к образованию на рельсах поперечных трещин и излому [76]. По этой причине применение смазок в США обязательно сопровождается удалением с рельсов сетки микротрещин и обезуглероженной зоны рельсошлифовальными поездами и вагонами.

В печати имеются примеры, когда интенсивное смазывание железнодорожного полотна приводило к отрицательным результатам [53].

Одним из методов защиты поверхностей трения от разрушительного действия ПАВ смазок и водородного изнашивания металлов может быть

нанесение специальных защитных покрытий. За рубежом, особенно в США, основными материалами для лубрикации стали твердые смазки на основе тефлона, так называемые "модификаторы трения", позволяющие наносить тонкие полимерные покрытия, способные также частично защищать материал колесных пар и рельсов от водородного изнашивания.

В Ростовском государственном университете путей сообщения (РГУПС) под руководством д.т.н. профессора Ю.А. Евдокимова и д.т.н., член-кор. РАН В.И. Колесникова разработан эффективный метод снижения проката подвижного состава, заключающийся в подавлении водородного изнашивания путем модификации материала композиционных тормозных колодок сополимером тетрафторэтилена с этиленом. Эксплуатационные испытания, проводившиеся на поезде 19/20 "Тихий Дон", показали, что применение колодок из модифицированного материала обеспечивает снижение наводороживания в 3 раза, а износ колеса в 1,7... 2,0 раза.

Еще в начале прошлого столетия Вильямс — Петерсон предложил метод защиты колесных пар от интенсивного изнашивания, заключающийся в нанесении на поверхность катания специального покрытия из бериллиевой бронзы (Патент США № 33272550), в качестве прототипа им взят Патент Великобритании № 10078 от 1896 года [47].

В настоящее время ААЖД в Транспортном исследовательском центре США г. Пуэбло осуществляются испытания медных покрытий, нанесенных на гребни колесных пар газотермическим методом. Эта технология, по мнению разработчиков небольшой шведской фирмы "Duroc AB", основывается на фундаментальных исследованиях. Широкое ее использование за рубежом ожидается только через 3...5 лет. По приведенным данным технология позволяет в 10...54 раза повысить износостойкость колеса [74].

На Северо-Кавказской железной дороге учеными Российской академии путей сообщения проводятся испытания специальных стержней, которые крепятся на подвижном составе и наносят защитные покрытия на гребни колесных пар при движении посредством применения смазочной композиции "РАПС", разработанной Ростовским университетом железнодорожного транспорта, содержащей до 30% по массе медь [27].

Исследование, проведенное в РАПС к.т.н. Е.В. Пиневич, указывает на возможность снижения интенсивности изнашивания гребней колесных пар в условиях применения данной смазки для моторных вагонов в 1,7...3,5 раза, а для прицепных вагонов — в 1,4...2,5 раза [49].

На Московской ж.д. были проведены следующие испытания. Рельсосмазыватель, установленный на втором пути, на перегоне между станциями "Москва-Казанская пас." и "Митьково" в кривой радиусом 250 метров был заправлен металлоплакирующей смазочной композицией "МСК-Р", разработанной и произведенной Корпорацией "Сплав-ЛТД" с целью уменьшения износа боковой грани рельса и гребней колесных пар вагонов, проходящих по данной кривой. Рельсосмазыватель, установленный на первом (внешнем) пути (путь выбран для сравнения) заправлялся

железнодорожной смазкой "СПЛ" производства Кусковского завода консистентных смазок.

Эффективность смазок оценивалась посредством ежемесячного контрольного визуального осмотра и замера износов боковой грани головок рельсов обоих путей специальной индикаторной скобой с точностью 0,005 мм.

Испытания окончены в 1998 г., за этот период произведено 8 контрольных замеров и получены следующие результаты:

А). В результате опытной эксплуатации указанной композиции расход смазочного материала по сравнению со смазкой "СПЛ", применяемой на первом пути, снижен в 2,5 раза.

Б). Металлоплакирующая смазка "МСК-Р" при использовании более одного месяца образует на боковой грани рельса разделительную пленку из пластичного металла, обнаруживаемую визуально.

В). Поверхность боковой грани внутренней стороны внешнего рельса на втором пути, где эксплуатировалась опытная смазочная композиция "МСК-Р", гладкая, не имеет пор и дефектов поверхности. Боковая грань внутренней стороны внешнего рельса на первом пути, где применялась стандартная смазка "СПЛ", имеет шероховатость и механические повреждения в виде наваров, выкрашивания материала, ярко выраженного лепесткового износа.

Г). За период испытаний износ боковой грани внешнего рельса второго пути за счет применения металлоплакирующей смазки "МСК-Р" снизился на 43% по сравнению с износом боковой грани внешнего рельса первого пути. До начала испытаний интенсивность изнашивания внешнего рельса первого пути была на 30...40% ниже.

Сравнительные испытания смазки "МСК-Р" и графитовой смазки "РП" на метрополитене полностью подтвердили результаты, полученные на Московской ж.д. Так, применение металлоплакирующей смазки "МСК-Р" обеспечивает снижение износа боковой грани в 2,15 раза по сравнению со смазкой "РП".

Следует отметить еще одно обстоятельство, на которое обращают внимание В.И. Балабанов и С.М. Мамыкин. Грузовые вагоны, которые работают в составе замкнутых маршрутов, особенно рудовозы, подвержены в большей степени абразивному изнашиванию. При их загрузке, движении по карьеру, а также выгрузке колесные пары движутся по рельсам, сильно загрязненным абразивом. Например, осмотр колесных пар, работающих в составе кольцевого маршрута "Костамукша—Череповец" на перевозке железной руды, выявил не только их интенсивный абразивный износ, но и глубокие вмятины на их поверхности катания и гребнях, являющиеся причинами наезда на высокотвердые частицы руды. При этом наличие на колесных парах остатков смазки только способствует налипанию абразива и усилению их изнашивания. В этом случае единственно целесообразным может являться повышение их твердости различными методами закалки или наплавки твердосплавных покрытий, что в свою очередь должно сопровождаться отменой применения лубрикации на данных маршрутах.

10. Буровое и нефтепромысловое оборудование

Одним из наиболее ответственных элементов нефтепроводного транспорта является насос. От его работоспособности в первую очередь зависит непрерывная и своевременная подача нефти потребителю. На магистральных нефтепроводах агрегаты имеют единичную подачу до 2,5 тыс. $м^3/ч$. Современные нефтеперекачивающие станции — сложное энергетическое сооружение с установленной мощностью до 32 тыс. кВт. В связи с этим предъявляются жесткие требования к герметичности насосов, их взрыво- и пожаробезопасности [16].

Узлы трения бурового и нефтепромыслового оборудования, такие как турбобуры, насосы внутрипромысловой перекачки нефти и насосы поддержания пластового давления работают в очень тяжелых условиях, когда смазкой трущихся деталей служат рабочие среды, многие из которых содержат механические примеси или являются химически активными. Выполнение таких узлов трения с герметической масляной ванной либо практически невозможно, либо сложно и дорого.

Для обеспечения необходимого срока службы ответственных и тяжелонагруженных узлов трения бурового и нефтепромыслового оборудования применение обычных термических и других известных технологических методов оказалось недостаточным. Необходимо было разработать материалы с высокой износостойкостью и способностью работать в рабочих средах с примесью абразива и воды. Наибольший интерес в этом отношении представляют композиционные материалы, что объясняется возможностью широкого регулирования их свойств путем создания композиций с лучшими качествами составляющих их компонентов. Пара трения из таких материалов сочетает в себе одновременно антифрикционные свойства, высокую износостойкость и прочность.

Изготовление деталей из износостойких композиционных и других твердых материалов затруднено — они плохо поддаются механической обработке. Более простой способ получения комбинированной детали (по принципу взаимного дополнения качества), изнашивающая часть, которой выполняется из композиционного материала с заданными размерами, а остальная часть из стали. Анализируя вышеприведенные доводы, М.В. Голуб разработал новый износостойкий материал ТМ-1, работающий в режиме избирательного переноса [17, 69].

10.1. Износостойкий материал ТМ-1

Работа д.т.н., проф. М.В. Голуба

Проведенный М.В. Голубом анализ отказов нефтепромыслового оборудования, в частности насосов магистральных нефтепроводов, показал, что 50...60% вынужденных остановок происходит из-за износа пар трения торцевых уплотнений. Срок службы пар трения, изготовленных из сталей с различной термообработкой в сочетании с бронзами или углеграфитами, при содержании в нефти 0,05% механических примесей со-

ставляет 1500...2000 ч. При повышении содержания механических примесей в нефти в период очистки нефтепроводов и резервуаров срок службы пар трения сокращается до 100...200 ч. Износ узлов гидравлической разгрузки (диск и подушка) многоступенчатых секционных центробежных насосов составляет 3...5 мм. На насосах типа ЦНС за межремонтный период изнашивается 2...6 комплектов разгрузочных устройств, детали которых изготовлены из стали 20Х13.

Созданный М.В. Голубом материал ТМ-1 в первую очередь был применен для повышения срока службы мощных насосов трубопроводного транспорта и насосов закачки воды в нефтяной пласт. Материал получают путем спекания смеси разнозернистых порошков карбидов вольфрама и кобальта с одновременной их пропиткой медно-никелевыми сплавами в водородной среде. Кобальт и никель обеспечивают прочное сцепление зерен карбидов вольфрама вследствие хорошей растворимости вольфрама в этих металлах. Медь, рассеянная по микропорам сплава, в условиях трения создает предпосылки для возникновения ИП при работе пар трения в нефти и воде.

Стендовые испытания пары трения сплав ТМ-1 по сплаву ТМ-1 и сплав ТМ-1 по бронзе БрО5Ц5С5 в среде нефти показали нагрузочную способность в 1,5...2 раза выше, чем пары трения сталь с цементированной контактной поверхностью по бронзе БрОЦС 5-5-5.

Сплав ТМ-1 по сплаву ТМ-1 может работать в среде, загрязненной абразивом. Высокая твердость и антифрикционность пары трения обеспечивает работу уплотнения без остановки насоса более 10000 ч, что в 4...5 раз превышает долговечность уплотнений с парами трения сталь по углеграфиту.

Большой интерес представляет пара трения ТМ-1 по бронзе БрОЦС5-5-5 при работе на дизельном топливе. Пара работает в режиме избирательного переноса. Пленка меди в процессе трения образуется на контактных поверхностях как на бронзовом, так и на твердосплавном кольцах, обуславливая низкий коэффициент трения (0,05...0,07) и высокую нагрузочную способность сочленения.

Изготовление деталей из композиционного материала ТМ-1. Сущность способа рассмотрим на примере изготовления контактного кольца торцевого уплотнения (рис. 2.31). В стальной заготовке 1 с необходимыми допусками на окончательную обработку делают кольцевую канавку, обеспечивающую размеры контактной поверхности. Для лучшего сцепления износостойкого материала со стальной заготовкой основание канавки выполняют рифленым. В канавку равномерным слоем засыпают шихту 2, состоящую из порошков карбидов металлов, которую затем прессуют пуансоном 3.

На поверхность непрессованного слоя равномерно укладывают пропиточный сплав на медной основе. Подготовленную заготовку помещают в электропечь, где в восстановительной (водородной) или нейтральной (в вакууме) среде происходит спекание, пропитка, пропаивание спрессованного слоя. При этом образуется надежный припой к стальной заготовке композиционного материала, который имеет твердость, близкую к

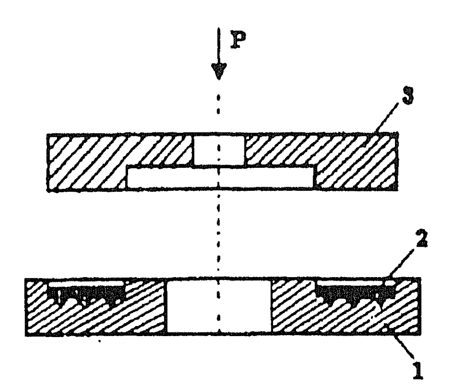


Рис. 2.31. **Схема прессования шихты в кольцевом пазу заготовки**

твердости введенных карбидов, достаточную прочность, высокую теплопроводность и антифрикционность, обусловленные свойствами пропиточного и связующего материала.

Охлажденную заготовку детали подвергают окончательной механической обработке, а поверхность трения шлифуется и притирается. Аналогично можно получить и цилиндрическую внешнюю или внутреннюю износостойкую поверхность для радиальных опор скольжения.

Для изготовления шихты применяют твердосплавные тонкодисперсные порошковые (до10 мкм) смеси карбида вольфрама с кобальтом (ВК-6 или ВК-8) и литой зерновой карбид вольфрама – релит зернистостью до 0,65 мм. Исходные компоненты смешивают. Смешивание может быть сухое и мокрое. В последнем случае в смесь добавляют пластификаторы, которые смазывают поверхность отдельных зерен, облегчая их взаимное скольжение при прессовании и сохраняя форму прессовки. Пластификатором служит обычный 10%-й раствор каучука в бензине. С целью удаления влаги шихту сушат в сушильном шкафу при температуре 80...90°С. Нагрузки прессования принимают из расчета плотности прессованного материала.

Для работы композитов в слабо агрессивной среде, такой как нефть, предпочтительнее пропиточные сплавы системы Cu – Ni как более простой, обладающей хорошими антифрикционными и теплопроводными свойствами, с температурой плавления 1050...1250°С. Для работы в агрессивных средах со значительным содержанием абразива пропиточные сплавы легируют хромом, марганцем и др. металлами.

Температуру спекания и пропитки принимают выше температуры плавления пропиточного материала на 50...100°С. Время пропитки после плавления пропиточного материала составляет 5...20 мин.

Металлокерамический композиционный материал имеет высокую твердость — 70...80 HRC. Материал обрабатывают шлифовальными кругами из карбида кремния или алмазными. Доводка контактных поверхностей колец алмазными пастами необходима для обеспечения гидравлической плотности контактной пары трения. При доводке получают шероховатость поверхности Ra = 0,25...0,05 мкм и незначительное отклонение от плоскости (не более 0,3...0,6 мкм.). Доводку осуществляют механическим способом или вручную.

Испытания материала ТМ-1. Испытаниями установлено, что при работе пар трения ТМ-1 по ТМ-1 и ТМ-1 по бронзе БрОЦС-5-5-5 в дизельном топливе и нефти имеет место режим избирательного переноса, характеризующийся сравнительно низким коэффициентом трения в до-

вольно широком диапазоне нагружения контактной пары. Режим избирательного переноса фиксировался по высокой нагрузочной способности пары трения, а также по визуально наблюдаемой на рабочей поверхности колец пленке образовавшегося тонкого слоя меди. Пленка меди подвергалась рентгенографическому анализу. Анализ подтвердил наличие меди на поверхностях трения колец [17].

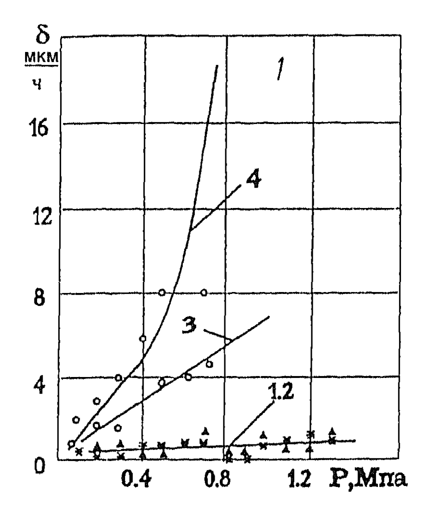


Рис. 2.32. **Зависимость скорости изнашивания в нефти колец пар трения от нагрузки:** *1, 2* – материал ТМ-1 (1) по ТМ-1 (2); *3,4* – сталь 16ХГТА с цементированной контактной поверхностью (3) по бронзе ОЦС 5-5-5 (4)

В промышленных условиях пару трения сталь с цементированной контактной поверхностью по бронзе БрОЦС 5-5-5 применять не следует ввиду наличия в перекачиваемых нефтях механических примесей, которые, внедряясь в более мягкий материал, приводят к абразивному износу и выходу пары из строя. На рис. 2.32 представлены результаты испытаний по оценке износа двух пар трения при смазке нефтью. Пара трения ТМ-1 (1) по ТМ-1 (2) практически не изнашивается в широком диапазоне нагружения при скоростях скольжения до 25 м/с, в то время как пара трения сталь по бронзе имеет катастрофический износ при нагрузках более 0,4 МПа.

Было проведено исследование по влиянию гранулометрического состава зерен карбида вольфрама на относительную износостойкость материала ТМ-1. Результаты испытаний приведены на рис. 2.33.

Из рис. 2.33 видно, что с увеличением среднего диаметра $d_{ср}$ зерен карбида вольфрама износостойкость возрастает. Наибольшей износостойкостью обладают композиции с зернистостью карбида вольфрама более 0,65 мм. Износ при режущем действии абразивных частиц происходит в основном по матрице (пропиточный медноникелевый сплав Cu-90%+Ni-10%): мелкие частицы карбида вольфрама, часто не разрушаясь, срезаются вместе с более мягкой матрицей. Износостойкость композиционного материала с зернами карбида вольфрама 0,65—1,0 мм в два раза выше, чем материал зернистостью 0,28—0,35 мм и почти в 4,5 раза выше износостойкости эталона (контактные кольца из силицированного графита СГ-11).

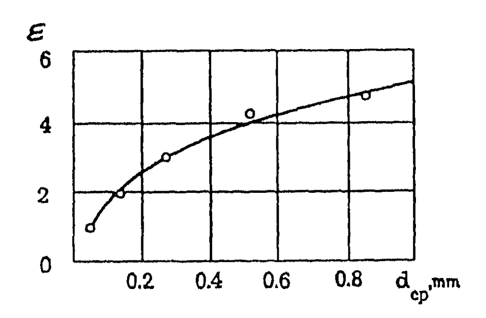


Рис. 2.33. **Зависимость относительной износостойкости ε композиционного материала от зернистости карбида вольфрама**

При работе материала ТМ-1 в условиях абразивной среды его износостойкость снижается из-за выскабливания абразивной массой пропиточного сплава, располагающегося между зернами карбида вольфрама. Поэтому для повышения износостойкости материала необходимо повышать стойкость пропиточного сплава к изнашиванию абразивными частицами. Это достигается легированием основы пропиточного сплава такими элементами, как хром, бор, кремний, марганец и др. Лучшие результаты были получены при следующих системах: медь—никель—бор-кремний или медь—никель—марганец—бор. Износостойкость таких материалов в 1,5...2,0 раза выше износостойкости сплавов системы медь—никель.

Применение материала ТМ-1 [69]. Применение материала ТМ-1 в узлах уплотнений нефтепромыслового оборудования позволило многократно увеличить срок службы насосов до ремонта. Были разработаны специальные конструкции уплотнений и других узлов трения насосов типа ЦНС для материала ТМ-1. Это узлы трения гидравлической разгрузки и радиальные опоры многоступенчатых секционных насосов, щелевые уплотнения и торцевые уплотнения валов насосов и системы защиты маслонаполненных редукторных вставок высокомоментных турбобуров.

Нанесение износостойкого композиционного материала на рабочие поверхности диска и подушки узлов гидроразгрузки и применение радиальной опоры позволило увеличить срок службы насоса до ремонта в 4...5 раз. Узлы гидроразгрузки насосов на промыслах Башкирии и Татарии имели наработку более 5 тыс. ч.

Для увеличения долговечности щелевых уплотнений рабочих колес секционных насосов в зоне их средней ступени была установлена радиальная опора с износостойкими контактными поверхностями (рис. 2.34).

Испытания показали, что промежуточная опора предотвращает износ щелевых уплотнений рабочих колес. Это значительно повысило КПД насоса.

Хорошие результаты показали промышленные испытания турбобуров с резино-композиционной осевой опорой, у которой подпятник изготовлен из резины, а стальной диск с рабочими поверхностями изготовлен из материала ТМ-1 [46]. При бурении скважин такими турбобурами с применением в качестве промышленной жидкости воды и глинистого раствора стойкость опытных дисков составила 300...550 ч, при стойкости серийной опоры — 55...60 ч. Отмечено, что износ рабочих поверхностей опытных дисков отсутствует, а износ резины в 1,5...2 раза ниже, чем резиновых подпятников, работающих в паре со стальными

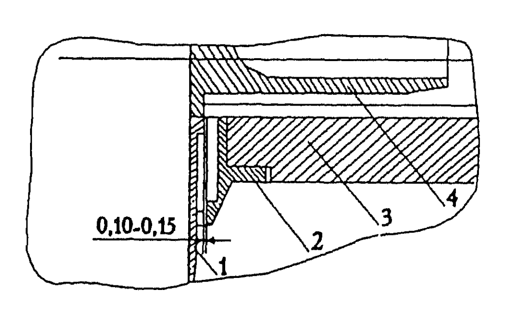


Рис.2.34. **Промежуточная опора центробежного насоса:**
1 – ступица рабочего колеса, наплавленная материалом ТМ-1; *2* – уплотнительное кольцо, наплавленное ТМ-1; *3* – направляющий аппарат; *4* – рабочее колесо

серийными дисками. Замечено также увеличение и энергетических параметров турбобуров с опытными осевыми опорами.

Высокую износостойкость показали опытные образцы торцевых уплотнений с парами трения из композита на винтовых насосах внутрипромысловой перекачки газонефтяных смесей и эмульсий. В объединении "Мангышлакнефть" они отработали более 6 тыс. ч. Ранее применяемые торцевые уплотнения имели срок службы в аналогичных условиях 300...500 ч.

Материал ТМ-1 показал высокую износостойкость при использовании его на насосах по перекачке горячего мазута, а также в торцевых уплотнениях насосов перекачивающих гидроабразивные смеси на предприятиях горнорудной промышленности и насосов водоснабжения городов [17].

10.2. Износостойкий материал для уплотнений электробуров

Работа к.т.н. Е.Н. Грискина

Технологический процесс изготовления торцевых пар трения был разработан Е.Н. Грискиным и осуществляется следующим образом [18]. На рабочем торце стальной заготовки выполняют канавку прямоугольного

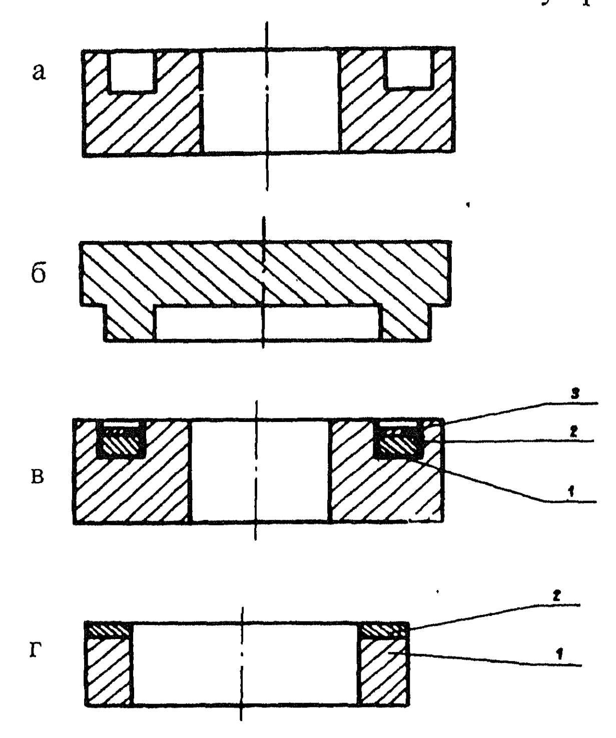


Рис. 2.35. **Этапы изготовления износостойких торцевых пар трения:**
а — стальная заготовка с кольцевой канавкой, *б* — пуансон, *в* — заготовка после меднения стенок (1) и прессования слоя релита (2) и порошка меди (3), *г* — кольцо пары трения с износостойкой рабочей поверхностью (2), образованной на стальной основе (1)

сечения (рис. 2.35, *а*), стенки которой меднят и покрывают тонким слоем релита и с помощью пуансона (рис. 2.35, *б*) прессуют при давлении 300...400 МПа. Сверху прессованный релит 2 покрывают слоем порошка меди *3* и снова прессуют при том же давлении.

Полученные таким образом заготовки *1* (рис. 2.35*в*) помещают в вакуумную печь, где при температуре 1150...1200°С происходит пропитка спрессованного слоя релита расплавленной медью. Остаточное давление в вакуумной печи поддерживают в пределах 1,33...0,13 МПа.

Расплавленная медь проникает в поры между зернами релита и на рабочем торце заготовки образуется прочно сцементированный и связанный со стальной основой *5* твердосплавный слой *4*, состоящий из твердых зерен релита и медной связки (рис. 2.35, *г*). Затем производят механическую обработку, в том числе шлифование рабочего торца алмазным кругом с последующей притиркой на чугунной плите алмазным порошком или алмазной пастой. Толщина рабочего слоя из нового композиционного материала 1...5 мм, иногда более. Для получения рабочего слоя толщиной 1,5 мм, применяемого в парах трения, необходимо засыпать в кольцевую канавку слой релита 2,8...3 мм. В этом случае канавку в заготовке выполняют глубиной 5 мм.

Изготовленная из одноименного материала торцевая пара трения обладает высокой износостойкостью и антифрикционностью. Содержание меди в рабочем слое составляет 11...12%. Композиционный материал состоит из карбидных зерен (эвтектика W2C+ WC), сцементированных прослойками меди.

Композиционный материал обладает рядом преимуществ по сравнению со спечеными вольфрамокобальтовыми твердыми сплавами ВК3, ВК8, ВК15 и др. Он менее хрупок и не имеет склонности к терморастрескиванию, что объясняется наличием медной прослойки.

Стендовые испытания торцевых уплотнений погружного электродвигателя типа ПЭД, применяемого в механизмах при добыче нефти из скважин, проводили при скорости скольжения 7,5 м/с, частота вращения 3000 об/мин, давлении 0,2 МПа. Во внутренней камере уплотнения находилось масло МС-20, снаружи соляная вода. Перепад давления 0,2 МПа. После 2000 ч работы износ пары трения составлял 0,027.

Аналогичные результаты были получены при стендовых испытаниях торцевых уплотнений насосов ГНОМ 100-25, применяемых при откачке воды. Уплотнения испытывали на границе жидких сред масло МС-20 — глинистая вода без перепада давлений при скорости скольжения 7,1 м/с и давлении 0,3 МПа. Средний суммарный износ пары трения за 500 м пути составлял 0,01 мм, а коэффициент трения 0, 082...0,095 [19].

При работе торцевых уплотнений на границе масло—вода попадание на поверхность трения воды вызывает в сочленении процесс избирательного переноса [20].

10.3. Смазочно-охлаждающие жидкости в нефтепромысловом оборудовании

Одним из средств повышения износостойкости механизмов бурового и нефтепромыслового оборудования явилось использование смазочных материалов с противоизносными свойствами. При бурении в основном применяют два вида смазочных материалов: традиционные смазочные материалы и промывочные растворы, которые наряду с основными функциями выполняют роль смазывающей и охлаждающей жидкости. При проходке мощных солевых отложений приготовляют промывочные жидкости на основе высококонцентрированных растворов солей, а также глинистые высокоминерализованные буровые растворы.

В Российском государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина были проведены научно-исследовательские работы по созданию новых буровых растворов, реализующих избирательный перенос при трении [31, 46, 48, 50, 51].

Работы д.т.н., проф. А.А. Петросянца, д.т.н., проф. В.Ф. Пичугина

Авторы и их ученики провели комплекс научно-исследовательских работ по повышению сроков службы стальных пар трения, реализующих избирательный перенос при трении и работающих в следующих средах:

— буровых жидкостях на водной основе (глинистых и минерализованных);

— минеральных маслах;

— нефти и дизельном топливе;

— буровых растворах на углеводородной основе.

Для реализации избирательного переноса были созданы специальные медьсодержащие добавки.

Установлена возможность повышения износостойкости не только пары сталь—сталь, но и пары бронза—сталь, резина—металл при скольжении и возвратно-поступательном движении. Лабораторные испытания показали, что при скольжении защитные свойства медной пленки сохраняются при нагрузке 14...16 МПа, а при качении — контактных нагрузках 7 ГПа, что имеет большое практическое значение при проектировании и эксплуатации оборудования.

В табл. 2.10 приведены значения износа штока и резинового уплотнения за 6 ч работы.

Как видно из данных, приведенных в табл. 2.10, максимальный износ пары резина—металл наблюдается в воде. Введение в насыщенные растворы медьсодержащей добавки в количестве 0,01% по объему способствует значительному увеличению износостойкости деталей и резкому снижению коэффициента трения в результате образования на поверхностях контактирующих тел медной пленки.

Таблица 2.10

№ п/п	Исследуемая среда	Возвратно-поступательное движение			Вращательное движение		
		износ, мм^3		коэф. трения	износ, мм^3		коэф. трения
		резина 1294	сталь 40Х		резина 1294	сталь 40Х	
1.	Техническая вода	32,74	2,56	0,060	208,3	10,42	0,080
2.	Насыщенный раствор хлористого магния	2,60	0,55	0,033	21,2	23,91	0,020
3.	Раствор № 2 + медьсодержащая добавка	0,95	0,13	0,026	15,7	7,34	0,017

В.Ф. Пичугин и С.М. Мкртчян показали возможность использования ИП для повышения срока службы шарошечного долота [51]. Они провели испытания на усталость шаров из стали 55СМ5ФА на четырехшариковой установке в различных средах и установили факт значительного повышения контактной прочности при добавлении в смазочную среду медьсодержащей добавки (рис. 2.36).

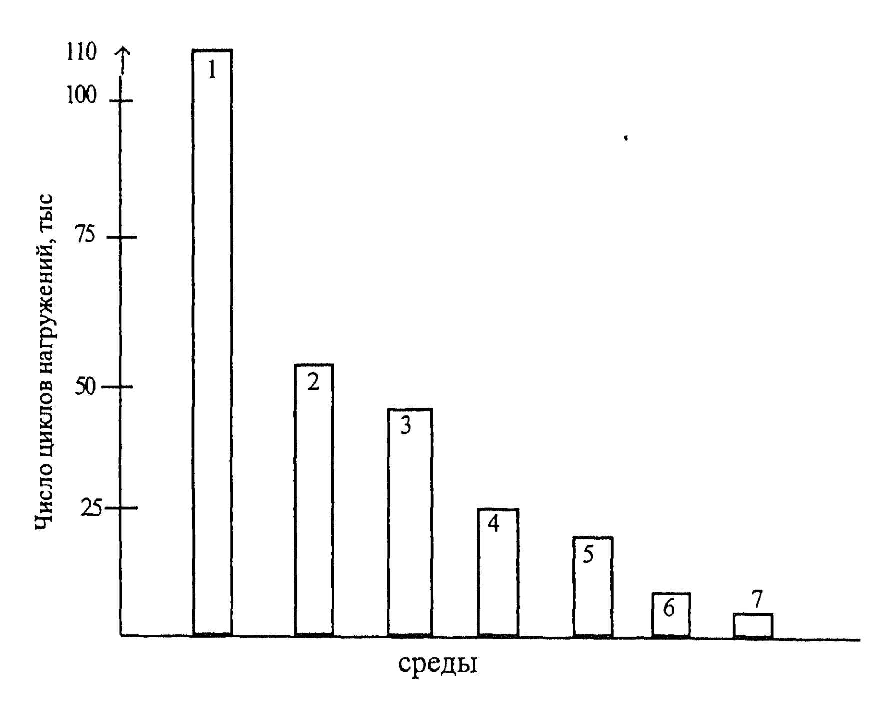


Рис. 2.36. **Сравнительные данные по усталости шаров на четырехшариковой машине трения в различных средах:**
1 – насыщенный раствор $MgCl_2$ + 0,006% $CuSO_4$; *2* – масло “Индустриальное –50”; *3* – гидрогель магния γ = 1, 26 г/см^3; *4* – насыщенный раствор $MgCl_2$; *5* – насыщенный раствор NaCl; *6* – дистиллированная вода; *7* – глинистый раствор

Использование промывочной жидкости с медьсодержащей добавкой увеличивает долговечность образцов в режиме циклического нагружения в 2...3 раза по сравнению с их долговечностью при аналогичных испытаниях без добавок.

Были проведены стендовые испытания натурных образцов опор долота при работе с различными растворами и добавками абразива и медьсодержащими добавками. В табл. 2.11 приведены данные испытаний элементов опоры долота В-190Т в некоторых средах после 150 тыс. оборотов шарошки.

Таблица. 2.11

№ п/п	Буровой раствор	Линейный износ, мм	
		шарики	ролики
1.	Насыщенный раствор хлористого магния + медьсодержащая добавка	0,0028	0,0015
2.	Раствор №1 + 3% абразива	0,0180	0,0020
3.	Водопроводная вода + 3% абразива	0,8200	0,1200

Выводы, полученные на основе лабораторных и стендовых испытаний, подтвердились при эксплуатации долот. При этом в качестве промывочных жидкостей использовали гидрогель магния плотностью I = = 1,27 г/см^3 (1) и минерализованный глинистый раствор I = 1,27...1,3 г/см^3 с медьсодержащими добавками в количестве 0,01% по массе (11). Получены следующие данные о работоспособности долот при бурении скважин в сопоставимых геологических условиях:

	I	II
Интервал бурения, тыс. м	2...3	2...3
Число долот	40	32
Общая проходка, м	450	728
Показатели на одно долото:		
проходка, м (%)	10,4 (100)	24,4 (234)
время работы, ч (%)	3,84 (100)	8,11 (210)
скорость бурения, м/ч (%)	2,69 (100)	2,99 (111)

Приведенные данные свидетельствуют о перспективности использования медьсодержащих присадок, реализующих избирательный перенос при трении в буровой технике.

11. Червячные глобоидные передачи

Глобоидная передача – разновидность червячной передачи, у которой основное тело червяка образовано вращением вокруг его оси части окружности червячного колеса (рис. 2.37). В средней плоскости колеса касание всех находящихся в зацеплении зубцов происходит по полному профилю (обычно прямолинейному). Если вместо цилиндрического червяка применить глобоидальный, контактные напряжения в зацеплении

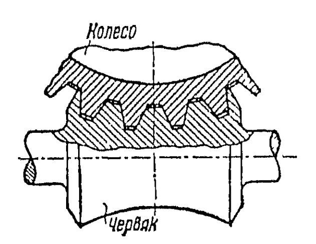


Рис.2.36. **Глобоидная передача**

червячной передачи могут быть значительно уменьшены. Глобоидальная передача компактнее червячной и по сравнению с ней допускает большую перегрузку.

В зацеплении этой передачи трения скольжения намного больше и КПД ее меньше, чем в цилиндрической передаче. Использование здесь эффекта ИП представляет значительный интерес (имеется в виду повысить КПД, снизить время приработки и повысить ресурс. Глобоидные передачи используются в лифтах, угольной промышленности, тяжелом машиностроении, станкостроении, авиации и др.

Выпускаемые нашей промышленностью червячные глобоидные передачи имеют скорость скольжения в зацеплении порядка 6 м/с и давление 100 МПа. Указанные условия допускают возможность использования эффекта ИП для самопроизвольного формирования контактных поверхностей в глобоидном зацеплении.

При точечном контакте образующаяся тонкая медная пленка легко уносится из зоны контакта стальным червяком, что способствует более быстрому формированию пятна контакта в зацеплении. Это положение высказано К.П. Волковым и было проведено испытание глобоидных редукторов [6].

Работа К.П. Волкова

Испытания глобоидных редукторов проводили на стенде, позволяющем определять потери на трение с большой точностью (точность измерений на валу колеса 0,2%, на валу червяка 0,4%).

Испытывали редуктор типа РГУ-8 (межосевое расстояние 80 мм, передаточное отношение 37, частота вращения 1500 об/ мин). Материал червяка — сталь 40Х (HRC 32...35), материал колеса – бронза БрОНФ10-1-1. Зубья (z =37) нарезаны глобоидной фрезой. Редуктор не подвергался приработке.

Перед началом испытаний измеряли основные параметры глобоидной пары. В редуктор был залит технический глицерин. В ходе испытаний каждый час фиксировали КПД, нагрузку от момента M, частоту вращения червяка, температуру глицерина и окружающей среды. Через каждые 8 ч работу прерывали для измерений зубьев колеса, пятна контакта и бокового зазора в зацеплении. Редуктор нагружали спупенчато, с учетом получения опытным путем предельной нагрузочной способности, используя приработку в режиме избирательного переноса.

Результаты испытаний приведены на рис. 2.37. При нагрузке, равной 150 % паспортной нагрузки, произошло падение КПД и быстрое повышение температуры. Осмотр показал, что пятно контакта зубьев колеса распространилось на 70% площади зуба, осевое смещение червяка не увеличилось, рабочая сторона витка червяка покрылась тонким слоем меди.

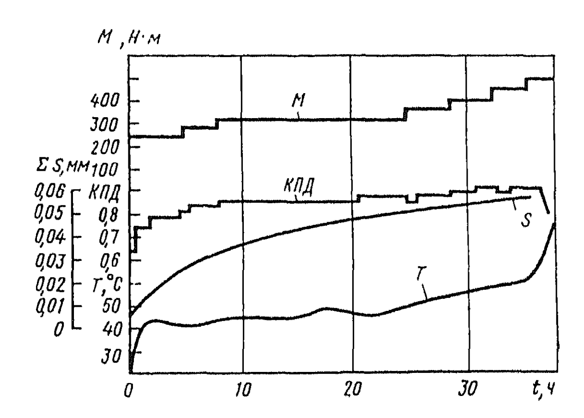


Рис. 2.37. **Результаты испытаний редуктора при смазывании глицерином**

Перегрузка редуктора не повлияла на состояние и износ зубьев колеса. Эксперимент показал, что в первоначальный период, работая в режиме ИП, редуктор быстро (за 40 мин) приработался и мог воспринимать нагрузку.

В режиме ИП было испытано еще восемь редукторов различных модификаций. Во всех испытаниях за 45 мин первоначальной приработки в режиме ИП значения КПД редукторов превышали паспортные показатели, которые в обычных условиях достигаются за 80...100 ч работы. Установлено, что ИП начинается через 2...3 мин после нагружения и переходит в установивщийся режим через 10...15 мин; на этот же промежуток времени в основном приходится большая часть прироста КПД. Пятно контакта распространяется на 35...40% поверхности зуба. Износ составляет 0,02...0,003 мм.

Если после приработки редуктора на глицерине перевести его на смазывание цилиндровым маслом, то через некоторое время (25...30 мин) медная пленка исчезнет, КПД редуктора снизится примерно на 8%, пятно контакта не увеличится. Испытания показывают, что при использовании ИП в первоначальный период работы редуктора в сравнительно короткий срок достигается оптимальное контактирование пары колесо – червяк, которое в дальнейшем обеспечивает надежную работу редуктора с высоким КПД и нагрузочной способностью. Всего было приработано более 80 редукторов в режиме ИП и ни в одном не было зарегистрировано задира, несмотря на то, что в некоторых редукторах первоначальное давление достигало 15 МПа.

Быстрая приработка колеса и червяка объясняется тем, что при контактном нагружении образующаяся медная пленка легко выдавливается и, кроме того, некоторая ее часть переходит на червяк при пластифицирующем действии поверхностно-активных веществ.

Отметим, что эксперименты К.П. Волкова проводились в конце шестидесятых годов, в то время еще не были разработаны высокоэффективные металлоплакирующие присадки к маслам, которые бы могли быть применены при эксплуатации редукторов. Глицерин не является смазоч-

ным материалом в силу ряда причин (малая термостойкость, способность впитывать влагу и др.) и потому эксперименты проводились только в режиме приработки. Однако К.П. Волков первый показал перспективу использования ИП в редукторах, включая редукторы наиболее нагруженные — глобоидного типа. В настоящее время О.В. Чекулаевым разработана металлоплакирующая присадка к смазочным маслам, реализующая эффект ИП. Присадка применяется в тяжелонагруженных, крупногабаритных редукторах метро.

12. Машины литейного производства

Трущиеся детали литейного производства работают в тяжелых условиях: высокие температуры, ударное воздействие, агрессивные и абразивные среды. Основными видами изнашивания трущихся деталей являются: абразивный, схватывание и изнашивание вследствие пластической деформации. Все это определяет малый срок службы деталей (для многих не более года).

Длительное время большие трудности доставляла пара ось – втулка рычажного механизма машин для литья под давлением. Нагрузки в этой паре трения достигают более 49 МПа. Изношенные детали восстанавливали ацетиленокислородной наплавкой. Такой способ неэкономичен, так как наплавленный слой толщиной 5...6 мм затем обрабатывался до толщины 1 мм.

А.И. Иватюненко на заводе "Сиблитмаш" разработал способ создания биметаллических деталей с антифрикционным слоем методом сварки взрывом. Был создан участок для производства подшипников скольжения, которые имели свойство работать в режиме избирательного переноса. Новые методы формирования рабочих поверхностей деталей, работающих на износ, могут быть применены для шатунно-поршневой группы, червячных передач и др. В качестве антифрикционного слоя применяли латунь Л63 (основной металл – углеродистая сталь).

Износостойкость биметаллических деталей, изготовленных сваркой взрывом, по сравнению с традиционной технологией литья подшипников из бронзы, увеличилась в 2...4 раза при уменьшении расхода цветных металлов в 20...100 раз; трудозатраты снизились на 20...50%.

В заключение поясним, каким образом образуется сервовитная пленка на трущихся поверхностях в паре сталь–латунь. При высоких температурах может произойти обесцинкование латуни. Это один из факторов возможного образования сервовитной пленки. Кроме того, высокие нагрузки и агрессивность среды способствуют растворению медно-цинкового сплава в зоне контакта. После образования сервовитного слоя поверхности трущихся деталей пассивируются и наступает режим избирательного переноса.

Приведенные данные свидетельствуют о больших возможностях применения ИП в узлах трения машин литейного производства. Оказалось, что при использовании в качестве смазочного материала солидола в паре

сталь–латунь в условиях повышенных температур можно осуществить ИП. Это свидетельствует о том, что до настоящего времени еще многое не изучено в части потенциальных возможностей использования ИП в узлах трения.

13. Металлорежущий инструмент

Процессы обработки металлов резанием сопровождаются, как известно, трением между передней поверхностью режущего инструмента и опорной поверхностью стружки, а также задней поверхностью инструмента и поверхностью резания.

Трение в процессах механической обработки оказывает большое влияние на износостойкость инструмента.

Существуют различные методы повышения износостойкости инструментов: совершенствование геометрических параметров режущей части, оптимизация применяемых режимов резания, использование различных смазочно-охлаждающих средств и т.д.

Смазочно-охлаждающие средства, применяемые для уменьшения трения и изнашивания инструмента, разделяют на жидкие, газообразные и твердые. В современном машиностроении в подавляющем большинстве применяют жидкие смазочно-охлаждающие средства. Из твердых смазочно-охлаждающих средств находят применение дисульфид молибдена и графит.

Природа трения и изнашивания двух находящихся во фрикционном контакте тел (в данном случае пара инструмент—заготовка) объясняется закономерностями молекулярно-механической теорией трения. Трение в процессе резания имеет ряд специфических особенностей, характерных только для механической обработки металлов резанием: наличие высоких температур на контактных площадках инструмента и заготовки; огромные давления, сопровождающие процесс резания; контактные площадки на поверхностях инструмента находятся в соприкосновении с ювенильными металлическими поверхностями.

Одним из путей снижения износа инструмента в процессе резания является создание в зоне контакта пары инструмент—заготовка условий для проявления эффекта ИП, выражающегося в образовании на рабочих поверхностях тонкой пленкой меди, имеющей значительную механическую прочность на сжатие и низкое сопротивление тангенциальному сдвигу. Такая твердая смазывающая пленка может быть получена в результате хемосорбционного взаимодействия некоторых медьсодержащих химических веществ, введенных в зону контакта, с поверхностями трения. Если во время работы инструмента в зону контакта его с заготовкой подавать компоненты, из которых образуется такая хемосорбционная пленка, то она будет сохраняться на рабочих поверхностях инструмента непрерывно в течение всего процесса резания. Наличие пленки снижает коэффициент трения за счет уменьшения времени непосредственного контакта поверхностей инструмента и заготовки, понижает температуру резания и, следовательно, уменьшает износ инструмента.

Известно, что в условиях работы режущего инструмента с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей проникновение этой жидкости на контактные площадки осуществляется по капиллярам, образующимся при "островном" контакте опорной поверхности стружки и поверхностями резания с рабочими поверхностями инструмента. Кроме того, этому проникновению способствуют колебания инструмента и обрабатываемой детали, имеющие место в процессе резания и приводящие к систематическим разрывам контакта. Однако возникающие капилляры имеют очень незначительные размеры сечений. Поэтому ввод на контактные площадки медьсодержащих соединений в виде даже высокодисперсных частиц весьма затруднен. Наиболее целесообразна подача медьсодержащего соединения в зону резания в виде раствора в жидкой среде, обладающей также поверхностно-активными и антикоррозионными свойствами.

Работа к.т.н. В.В. Анисимова

С целью проверки возможности использования эффекта ИП при работе металлорежущих инструментов, выполненных из быстрорежущих сталей, В.В. Анисимовым [1] была поставлена серия экспериментов. Исследования проводили в основном на операциях фрезерования и сверления.

В одном из опытов прорезной фрезой диаметром D = 80 мм и шириной B = 4 мм, выполненной из быстрорежущей стали Р6М5, фрезеровалась заготовка из стали 12Х18Н10Т при скорости резания V = 63 м/мин, глубине резания t = 3 мм, подаче s = 64 мм/мин. Прорези фрезеровались по всей длине заготовки L = 240 мм. По окончании обработки каждой из прорезей производили замер максимальной фаски износа по задней поверхности зубьев фрезы h с помощью микроскопа МБП-2. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовали 5%-ю водную эмульсию на основе эмульсола ЭГТ. Расход жидкости – 2 л/мин.

После фрезерования первой прорези величина фаски износа по задней поверхности зуба фрезы h составляла 0,05, второй прорези – 0,08, третьей – 0,12, четвертой – 0,15, пятой – 0,2 мм. При фрезеровании шестой прорези на длине L = 80 мм износ достиг критической величины 0,6 мм, фреза "села". График изменения величины фаски износа h в зависимости от пути резания l в этом опыте (кривая *1*) представлен на рис. 2.38.

После этого в водную эмульсию был добавлен сульфат меди $CuSO_4$ из расчета 15 г на 1 л эмульсии и была испытана новая фреза из той же партии инструментов. Так же как и в предыдущем опыте, по окончании фрезерования каждой из прорезей производился замер величины фаски износа по задней поверхности h. Всего было обработано пять прорезей, а при фрезеровании шестой прорези процесс обработки был прекращен при достижении длины фрезерования L = 80 мм. Измерение h при этом характеризовалось следующей последовательностью: по окончании первой прорези h = 0,08, второй – 0,1, третьей – 0,11, четвертой – 0, 13, пятой – 0,15 мм. График изменения h этого опыта виден на рис.2.38 (кривая *2*).

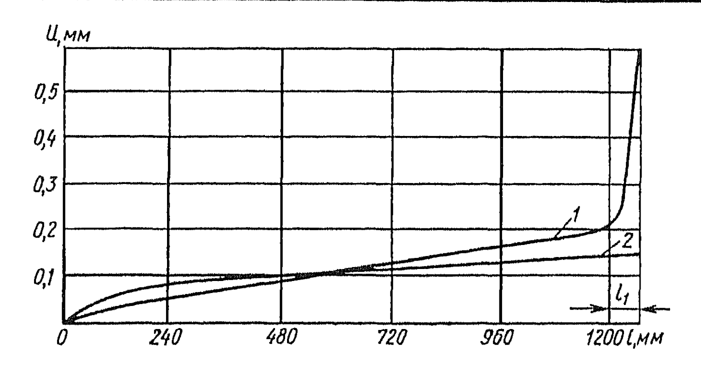


Рис. 2.38. **Кривые износа фрезы:**
1 – охлаждение 5% -й водной эмульсией; *2* – охлаждение 5%-й водной эмульсией + $CuSO_4$

На задних поверхностях режущих зубьев образовался осадок черного цвета (окислившаяся на воздухе пленка меди). Осадок этот становился тем значительнее, чем большее время работал инструмент в условиях применения раствора $CuSO_4$ в эмульсии.

Для выявления роли ПАВ при использовании эффекта ИП в процессах резания металлов В.В. Анисимовым был поставлен следующий опыт.

В заготовках из сталей 38ХА и 40Х (твердостью HRC 32) сверлом d = 10 мм из быстрорежущей стали HSS сверлили отверстия на глубину 40 мм при скоростях резания v-1 = 25,1, v-2 = 19,8 и v-3 = 12,6 м/мин до появления на задних поверхностях инструментов фаски износа h = 0,5–0,6 мм.

При эксперименте сравнивали интенсивности изнашивания сверла при одних и тех же скоростях резания в условиях применения различных смазочно-охлаждающих сред: *1*—5%-й водной эмульсии на эмульсоле ЭГТ, *2*–5%-й водной эмульсии + $CuSO_4$ (20 г/л) + олеиновая кислота (0,5 об.%). Опыты производили двукратно и в качестве итоговых результатов брали средние арифметические значения двух замеров. Графики из-

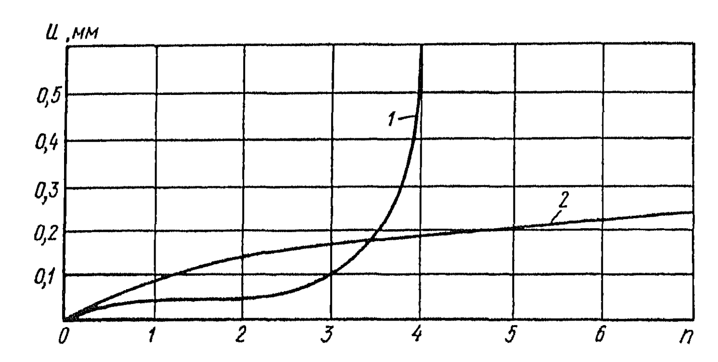


Рис.2. 39. **Зависимости износа h сверла от числа n обработанных отверстий при резании в различных средах (обрабатываемый материал – сталь 38ХА; v = 25 м/мин; s = 0,041 мм/об):**
1 – 5%-я водная эмульсия; *2* – 5%-я водная эмульсия+$CuSO_4$ (20 г/л)+олеиновая кислота (0,5 об. %)

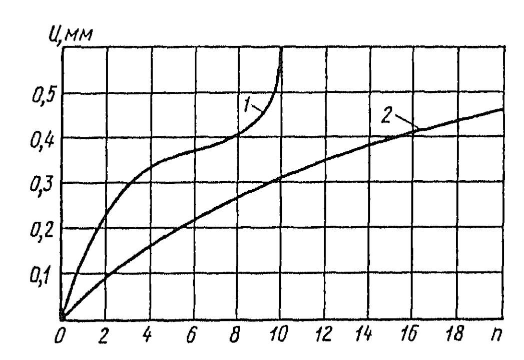


Рис.2.40. **Зависимость износа h сверла от числа n обработанных отверстий при резании в различных средах (обрабатываемый материал – сталь 38ХА; v = 19, 8 м/мин; s = 0,041 мм/об):** *1* – 5%-я водная эмульсия; *2* – 5%-я водная эмульсия + $CuSO_4$ (20 г/л)+олеиновая кислота (0,5 об.%)

носа h сверл в зависимости от числа n обработанных отверстий при различных режимах резания и применении различных смазочно-охлаждающих жидкостей показаны на рис. 2.39–2.41.

Наблюдение за рабочими поверхностями инструмента и стружкой показало, что при введении в зону резания жидкости *2* на инструменте и стружке наблюдается тонкий слой меди.

Исключение из рабочей жидкости олеиновой кислоты приводило к тому, что наряду с медью на рабочих поверхностях инструмента выпадало довольно твердое вещество черного цвета, которое "загрязняло" сверло, создавая неоднородность медного слоя, в результате чего задняя поверхность выглядела неровной, а режущая кромка "рваной". С понижением скорости резания это вещество становилось пастообразным, а количество его столь значительным, что при v-3 = 12,6 м/мин оно целиком покрывало рабочую часть сверла и препятствовало осаждению меди. Износ при этом резко возрастал. Можно предположить, что введение в рабочую жидкость дополнительного количества ПАВ (олеиновой кислоты) благоприятно влияет на проявление ИП.

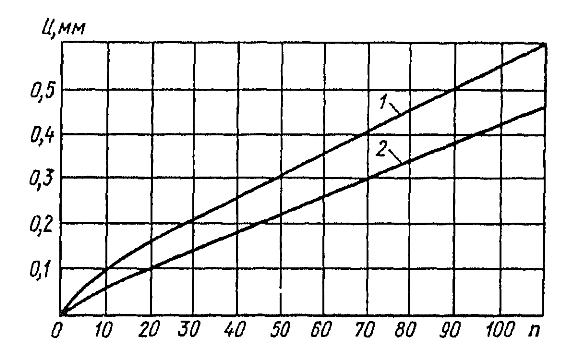


Рис. 2.41. **Зависимость износа h сверла от числа n обработанных отверстий при резании в различных средах (обрабатываемый материал – сталь 40ХА; v = 12,6 м/с; s = 0,041 мм/об):** *1* – 5%-я водная эмульсия; *2* – 5%-я водная эмульсия+$CuSO_4$ (20 г/л)+олеиновая кислота (0,5 об. %)

Отмечено, что количество осадка меди переменно по длине обрабатываемого отверстия. Так, в начальный период обработки, когда сверло углублялось на небольшую величину, выпадение осадка было меньшим, чем в конце сверления, когда развиваемые в зоне трения температуры становились более значительными и выделяющееся тепло интенсифицировало происходящие физико-химические процессы.

Как известно, при возрастании скоростей резания температура значительно возрастает в зоне контакта инструмента с заготовкой.

Проведенные опыты показывают, что в диапазоне скоростей резания 12...25 м/мин при сверлении увеличение скорости резания и соответственно повышение температуры в зоне обработки оказывает благоприятное влияние на проявление ИП и, следовательно, на увеличение износостойкости инструмента. Следует отметить также, что при увеличении скорости резания прочность осадка и его сцепление с передней и задней поверхностями сверла возрастают.

Образование медной пленки на рабочих поверхностях инструмента и снижение его износа наблюдалось также и при использовании водных растворов сульфата меди. Так, в одном из опытов спиральным сверлом d = 10 мм из быстрорежущей стали Р6М5 обрабатывалась заготовка из стали 40Х твердостью НВ 207. В заготовке последовательно сверлили отверстия на глубину l = 3d = 30 мм при v = 30 м/мин, s = 0,1 мм/об. За критическую величину фаски было принято значение h = 0,8 мм.

При сверлении с подачей в зону резания смазочно-охлаждающей жидкости 5%-й водной эмульсии на основе эмульсола ЭГТ фаска износа h = 0,8 мм была получена по окончании обработки 17 отверстий. При сверлении с применением в качестве рабочей жидкости водного раствора сульфата меди (концентрацией 20 г/л), с добавлением в качестве ПАВ олеиновой кислоты (0,5 об.%) износ h = 0,8 мм был достигнут после обработки лишь 50-го отверстия.

Таким образом, в данном случае было получено повышение износостойкости инструмента приблизительно в 3 раза.

14. Материалы, реализующие избирательный перенос при трении

14.1. Медистый чугун для узлов трения текстильных машин

Работа к.т.н. Ю.Ф. Макарова и к.т.н. Е.М. Турчкова

Серый медистый чугун, работающий в режиме ИП, разработан и изучен Ю.Ф. Макаровым и Е.В. Турчковым [41...43]. Он может работать в осевых и радиальных подшипниках скольжения, червячных, винтовых и других передач с односторонним, реверсивным и пульсирующим движением. Смазывание узлов трения может осуществляться как жидкими, так и пластичными смазочными материалами.

Для работы в паре с медистым чугуном используют легированные и углеродистые стали после термической или химико-термической обработки. Твердость поверхности трения стальной детали должна быть выше твердости чугуна не менее чем на 100 НВ.

Предельные значения давлений при замене в узлах трения обычных марок серого чугуна на медистый и при реализации ИП повышаются в 1,5...2 раза и могут достигать 15...20 МПа.

Основное влияние на характеристики трения и изнашивание медистого чугуна в режиме ИП оказывает содержание меди в чугуне. Интенсивность изнашивания I и коэффициент трения f при испытании на изнашивание чугунов в паре со сталью при смазывании глицерином (скорость скольжения 0,55 м/с, давлении 15 МПа) имели следующие значения (табл. 2.12):

Таблица 2.12

Содержание меди в чугуне, %	0	2	4	7	10
I, мкм/км	1,2	0.04	0,008	0	0
f	0,086	0,081	0,059	0,033	0,028

Углерод и марганец в составе серого медистого чугуна на характеристики трения и изнашивания оказывают положительное влияние, а кремний препятствует реализации избирательного переноса.

Ю.Ф. Макаров и Е.В. Турчков считают, что наилучшее сочетание свойств серого медистого чугуна и характеристик трения и изнашивания в режиме ИП наблюдается при перлитной металлической основе. Наличие в структуре феррита резко снижает нагрузочную способность, а структурно свободный цементит и ледебурит ухудшают обрабатываемость деталей резанием и вызывают усиленное изнашивание стального контртела.

Содержание меди в чугуне не выше предела растворимости в жидком растворе (4...7%) способствует первичной и тормозит вторичную стадию графитизации. Поэтому металлическая основа медистого чугуна с обычным для серых чугунов содержанием других элементов при литье в песчаные формы получается в основном перлитной. При содержании меди 4 % в структуре чугуна обнаруживаются округлые включения высокомедистой фазы. При содержании меди более 7% в структуре появляются структурно свободный цементит и ледебурит и может проявляться ликвация высокомедистой фазы.

Учитывая влияние рассмотренных элементов на характеристики трения и изнашивания серых чугунов, их графитизирующую способность и условия получения перлитной металлической основы без заметной ликвации высокомедистой фазы, для протекания ИП в узлах трения чугун – сталь рекомендуется следующий состав серого медистого чугуна, %С 3,2...3,6; Si 1,0...1,8; Mn до 0,8; Cu 4...7.

Основным условием реализации эффекта ИП в парах трения медистый чугун—сталь является применение смазочных материалов, препятствующих окислению поверхностей трения типа ЦИАТИМ-201,

ЦИАТИМ-203 и др. При использовании смазочных материалов общего назначения эффект ИП реализуется путем ввода в их состав поверхностно-активных веществ. В индустриальные масла общего назначения можно добавить 0,75...1% стеаратов металлов, а в пластичные смазочные материалы общего назначения (солидолы) можно ввести антиокислительную присадку — дифениламин в количестве 0,35...0,7%.

Серые медистые чугуны можно выплавлять как в вагранках, так и в электрических индукционных тигельных печах. Технология его выплавки такая же, как и обычных серых чугунов. Для получения заданного содержания меди в чугуне в качестве легирующей добавки в шихту можно использовать медь марок М3 или М4. При расчете шихты необходимо учитывать, что угара меди при выплавке почти не наблюдается.

Механические свойства медистого чугуна при перлитной металлической основе соответствуют серому чугуну СЧ 21.

14.2. Антифрикционный самосмазывающийся материал Афтал

Работа к.т.н. Ю.В. Гнусова

Материал представляет собой многослойную волокнистую структуру, состоящую из различного сочетания по слоям политетрафторэтиленовых, стеклянных аримидных,металлических и других нитей, заключенных в металлическую матрицу [15]. В зависимости от назначения и условий эксплуатации материал выпускается в виде листа толщиной 0,5... 0,8 мм в нескольких модификациях. Особенности структуры материала позволяют различать рабочую и нерабочую стороны листа. Нерабочая сторона листа представляет собой 100% связующего металла, что позволяет наносить материалы в виде покрытия на металлические поверхности различной формы методом пайки. Покрытие может быть образовано на стальной подложке непосредственно в процессе получения материалов.

Подшипники из материала Афтал имеют следующие эксплуатационные характеристики при работе без смазки:

температурный интервал эксплуатации	13...523 К
максимальная удельная нагрузка	400 МПа
максимальная скорость скольжения	1 м/с
коэффициент трения	0,02...0,2
допускаемый режим эксплуатации [P.V]	6,1 МПА.м/с
износостойкость	$10^{-9}...10^{-10}$

Материал способен работать в вакууме, в агрессивных и инертных средах.

Основной особенностью материала является то, что в качестве металлической матрицы может быть использована медь или сплавы меди с оловом и свинцом. При этом материал может быть получен с остаточной пористостью 20%. В этом случае детали с покрытием перед их установкой в узел трения пропитывают маслом, что позволяет обеспечить реализацию избирательного переноса в процессе эксплуатации и длитель-

ное время поддерживать этот режим за счет подпитки смазочной жидкостью, содержащейся в порах материала. При этом коэффициент трения снижается на порядок, а допускаемая скорость скольжения может быть увеличена.

Материал Афтал обладает свойствами как полимеров – сравнительно небольшим удельным весом, эластичностью, так и свойствами, присущими металлам – высокой электропроводностью и теплопроводностью. Наиболее эффективно применять материал в виде покрытия на металлических поверхностях различной формы. Важным достоинством является то, что покрытие можно наносить на самые различные металлы и сплавы: сталь, алюминиевые сплавы, титановые сплавы и др.

В качестве контртела в подшипниках скольжения желательно использовать стальной вал, закаленный до твердости не ниже HRC 45 с шероховатостью Ra = 0,2...0,4 мкм. Рекомендуемый диаметральный зазор равен 0,004...0,01 от диаметра вала. Применение валов с хромовым и никелевым покрытием увеличивает ресурс работы узлов трения.

В наиболее нагруженных узлах трения материал используется в виде покрытия, которое наносится на внутреннюю или наружную поверхность металлической обоймы, или на цапфу вала, или любую другую трущуюся поверхность любых размеров.

В слабонагруженных узлах трения материал используется в виде листа, из которого изготавливают свертные втулки и другие детали, которые могут быть закреплены в посадочные отверстия развальцовкой или вклеены эпоксидными и фенолформальдегидными клеями. Во всех случаях должны быть обеспечены посадочные размеры без применения механической обработки материала.

14.3. Порошковый железо-медно-стеклянный материал (ЖМСМ)

Работа д.т.н. проф. В.Г. Мельникова

Для узлов трения, смазываемых технологическими средами, был разработан металлостеклянный материал ЖГр3Ст7Д3 (А.с. № 68492, СССР) с высокими антифрикционными свойствами [44, 45]. В состав этого материала была введена медь путем химического восстановления ее на частицах порошка из стекла. Оптимальное количество меди согласно исследований В.Г. Мельникова было 3 мас.%.

Автор показал, что если порошок меди ввести в матрицу металлостеклянного материала, то это не приводит к значительному улучшению свойств последнего из-за неравномерного распределения меди по объему матрицы.

В процессе изнашивания железо-медно-стеклянного материала в растворах щелочей на поверхностях трения стали и самом материале образуется медьсодержащая пленка. Коэффициент трения при этом становится в пределах 0,001...0,0015 и износ материала трудно фиксировался (0,08... 0,12) $\cdot 10^{-10}$. Профилографирование поверхностей трения и избирательное вытравливание подтвердило содержание меди в пленке (рис. 2.42).

Были выполнены исследования по выяснению механизма этого явления [44]. Как было установлено, чем выше концентрация растворов щелочей, тем быстрее образуется медьсодержащая пленка на трущихся поверхностях. Наиболее легко эффект низкого трения проявляется в растворах LiOH, хуже – в растворах KOH, видимо, это связано с уменьшением химической активности щелочей в ряду LiOH – NOH – KOH. Разрушение трущихся поверхностей в этих растворах носило вид чешуйчатого отслаивания металла.

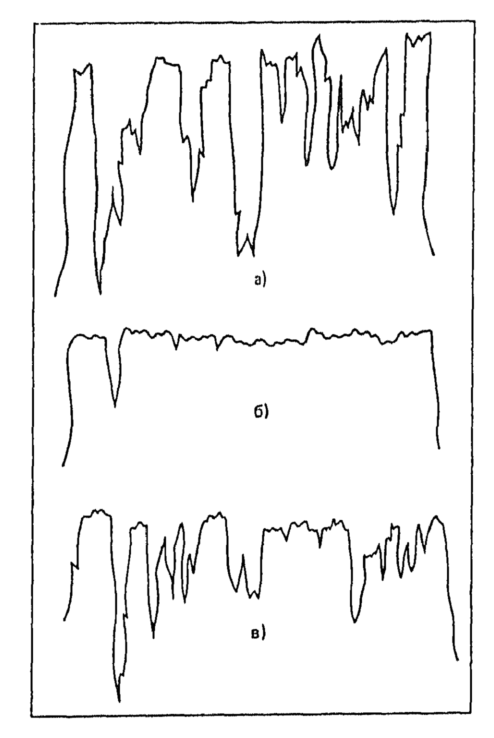


Рис. 2.42. **Профилограммы поверхностей трения порошкового железо-медно-графитового материала ЖГр3Ст7Д3:**
а – до трения; *б* – после трения в растворе гидроксида натрия; *в* – после трения и избирательного вытравливания меди. Раствор травления, масс.% 30 HNO_3; *б* – $K_2Cr_2O_7$; 64 H_2O

Длительность образования медьсодержащей пленки тесно связана с нагрузкой при трении; повышение удельной нагрузки увеличивало время реализации этого явления. Для различных концентраций растворов щелочей существуют предельные нагрузки, превышение которых ведет к ускоренному изнашиванию железо-медно-стеклянного материала.

В реализации режима ИП важная роль принадлежит стеклу, которое входит в состав материала. При трении в аналогичных условиях порошкового железомедного материала снижение коэффициента трения не наблюдается (рис. 2.43).

Щелочи действуют на стекло во много раз интенсивнее, чем кислоты. В.Г. Мельников предполагает, что в результате механохимических процессов стекло, входящее в состав порошкового материала, растворяется в щелочной среде, образуя в зоне контакта коллоидный раствор в виде золя кремниевой кислоты.

Поскольку коллоид обладает высокой адсорбционной способностью, ионы натрия могут быть замещены ионами меди, имеющими более высокую валентность и меньший радиус сольватированного иона.

Ионы меди, образующие диффузионный слой кремнеземной мицеллы, оседают на очищенной от окисных пленок поверхности стального контртела благодаря кулоновскому и адгезионному взаимодействию. Образующийся слой меди содержит продукты механохимических превращений в щелочной среде, он довольно прочен и эластичен и может быть удален с поверхности только механической обработкой и травлением. На порошковом материале слой меди образуется позже, он более рыхл и пористый.

Далее автор анализирует возможность образования сервовитной пленки по схеме, подобной внутреннему электролизу, а также исследует влияние внешней поляризации на антифрикционные свойства сопряжения железо—медно-стеклянный материал—сталь. Как было установлено, поляризация повысила предельную нагрузку пары трения с 3,0...3,5 МПа до нагрузки 7,0...7,5 МПа (рис.2. 44).

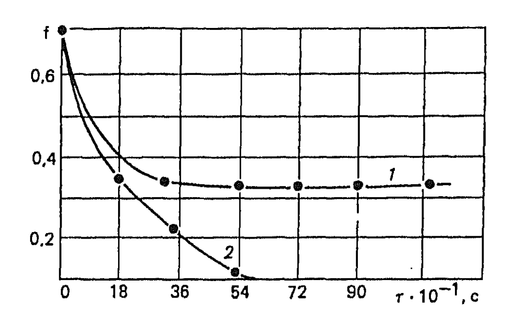


Рис.2.43. **Зависимость коэффициента трения от времени при различном составе порошкового материала, масс. %:**
1 – 94 железа, *3* – графита, *3* – меди; 2–87 железа, 3 графита, 3 меди, 7 стекла

С увеличением скорости скольжения допустимые удельные нагрузки повышаются до 12...13 МПа. Автором на основании испытаний построена диаграмма применения материала в координатах р, МПа — v, м/с (рис. 2.45).

Из разработанного железо-медно-стеклянного материала были изготовлены втулки подшипников скольжения ванн линии мерсеризации тканей, машин отбельного и отделочного цехов красильно-отделочных фабрик. Подшипниковые узлы работали в растворах едкого натра концентрации 40 г/л. В процессе работы на поверхностях трения стального вала и железо-медно-стеклянного подшипника визуально наблюдалась тонкая медьсодержащая пленка.

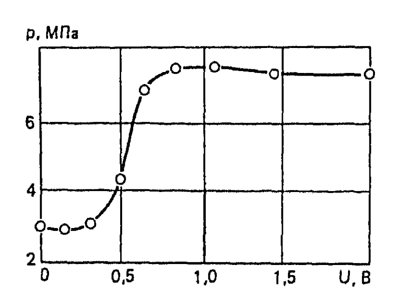


Рис. 2.44. **Влияние напряжения поляризации пары трения В на удельную нагрузку Р при сохранении медьсодержащей пленки на поверхностях трения**

С учетом допустимой величины рабочего зазора подшипникового узла и зафиксированной интенсивности изнашивания пары трения срок службы подшипников скольжения из разработанного материала составляет 5...6 лет, т.е. в 2...3 раза больше, чем обычно.

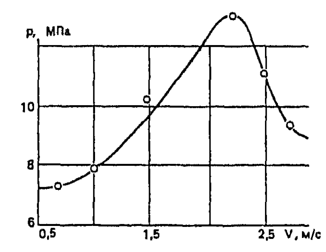


Рис. 2.45. **Зависимость удельной нагрузки р от v скорости скольжения медьсодержащей пленки. Напряжение поляризации 1,5 В**

14.4. Материалы для слаботочных электрических контактов

В приборостроении широко используют скользящие контакты, работающие в условиях сухого трения под воздействием различных токовых нагрузок. Часто к этим условиям помимо электрических параметров (таких, как постоянство переходного сопротивления, низкий температурный коэффициент электросопро-

тивления) предъявляются требования по определенному моменту трогания. Одной из важных характеристик является высокая износостойкость материалов контактной пары.

В связи с требованиями надежного контактирования для изготовления скользящих контактов используются сплавы из благородных металлов, которые способны длительное время противостоять окислению и, следовательно, сохранять неизменным контактное сопротивление.

Практика использования благородных металлов показала, что не все материалы обладают достаточной надежностью при работе скользящих контактных пар. Подбор материалов контактных пар, как правило, производится эмпирически.

Работа Л.В. Рабинович, Н.Н. Казаковой, Т.П. Брегман

Авторами были проведены исследования работоспособности сплавов благородных металлов на основе золота, палладия, платины и серебра [58]. Определялись коэффициенты трения контактных пар, их износостойкость, изменение профиля поверхности при трении, влияние формы контактирующих поверхностей и т.п.

При исследовании обнаружено, что контакты из золотомедных сплавов марок ЗлМ-750, ЗлМ-800 обеспечивают высокую наибольшую рабо-

Таблица 2.13

Характеристика испытанных материалов

№ п/п	Наименование устройства	Материал: кольца или обмотки	Материал: контакта	Геометрия контакта	Контакт. давл.	Скорость перемещен. конт. V, об/мин	Ресурс работы, ч	Механич. св-ва кольца обмотки: тверд. Hv, кг/мм²	Механич. св-ва кольца обмотки: прочн. $\sigma_в$, кг/мм²	Твердость контакта Hv, кг/мм²
1	Коллекторное устройство	Кольцо – нержавеющая сталь марки ЭИ-474	ПдСр40	Цилиндр.	15	6000	50	250	—	180
2			ПдВ-20							360
3			ЗлМ-800					350		270
4			ЗлМ-750							260
5			НЧ1ХГ							440
6	Потенциометр	Обмотка из константана	ПдСр40	Цилиндр.	15	8	150	—	120	180
7			ПдВ-20							360
8			ЗлМ-800							260
9			ЗлМ-750							270
10			СрМ-900							130
11	Потенциометр	Обмотка из сплава ПдВ-20	ПдСр-40	Сферич.	40	60	10	—	140	180
12			ПдВ-20							360
13			ЗлМ-800							260
14			ЗлСрМ5 83-80							240
15			ПдИ-18							—
16			СрНМ2-20							150

Таблица 2.14

Результаты испытаний коллекторов и потенциометров

№ п/п	Наименование устройства	Материал		Глубина износа дорожки колец или потенц.	Износ контактов		Характеристика работы пары
		кольца или обмотки	контакта		глубина износа, μ	уменьш. длины, мм	
1	Коллекторное устройство	Кольцо — нержавеющая сталь марки ЭИ-474	ПдСр-40	30	—	1,85	Значительный износ колец и контактов
2			ПдВ-20	20	—	1,3	Значительный износ колец и контактов
3			ЗлМ-800	2	—	0,3	Незначительный износ колец и контактов
4			ЗлМ-750	2...3	—	0,4	На кольцах перенос золота
5			Н-Ч1ХТ	30	—	0,7	Износ контактов незначительный, но дорожка на кольцах глубока
6	Потенциометр	Обмотка из константана	ПдСр-40	10	8	—	Значительный износ потенциометров и контактов между витками продуктов износа
7			ПдВ-20	6	10	—	
8			ЗлМ-800	1	2...3	—	Износ потенциометров и контактов мал, дорожка гладкая, продуктов износа почти нет
9			ЗлМ-750	1...1,5		—	

тоспособность контактных пар при самых различных материалов и конструкциях второго элемента пары.

В таблицах 2.13 и 2.14 приведены результаты исследования скользящих контактов из золотомедных и других сплавов в различных контактных устройствах (коллекторах, потенциометрах) и дана их характеристика.

Из табл. 2.14 видно, что при использовании в качестве контактов сплавов золото—медь износ минимальный, отсутствует схватывание. Следует также отметить, что на поверхности коллекторов из нержавеющей стали была четко видна дорожка желтого цвета — перенос золота. Применение других материалов, имеющих большую или меньшую твердость, чем золото (см. табл. 2.14), не обеспечивает достаточной износостойкости пары.

Дальнейшая работа по выбору менее дефицитных материалов для скользящих контактов показала, что явление избирательного переноса происходит и на металлокерамических сплавах на основе серебра марок ПдСрН70-5 и ПдСр70. Авторы пришли к выводу, что явление избирательного переноса, в частности золота, обеспечивает минимальный износ скользящих слаботочных электрических контактов.

Работа д.т.н. проф. В. Г. Куранова

В.Г. Куранов, анализируя требования к материалам слаботочных электрических контактов [39], пришел к выводу, что оптимальные свойства поверхности слаботочных электрических контактов могут быть при следующих условиях:

1) равновесие окислительно-восстановительных процессов и наличие схватывания;

2) ограничение схватывания в тонком поверхностном слое – выполнение правила положительного градиента механических свойств;

3) равновесие взаимного переноса;

4) измельчение поверхностного слоя и переход макропереноса в микроперенос.

Все эти условия наилучшим образом выполняются эффектом избирательного переноса.

Физическая модель контактной пары слаботочного скользящего контакта, удовлетворяющая четырем отмеченным условиям, представлена на рис.2.46.

Она состоит из твердых тел 1, 2 (основы) и мягкого поверхностного токопроводящего слоя (тело 3). В слое 3 под действием трения будет возрастать термодинамически неустойчивая система. Движение дислокаций приведет к выходу их на поверхность и снимет напряжения. Здесь будут происходить все элементы, характерные для ИП, включая и растворение поверхностного слоя.

Практика показала, что наилучшие условия в части износостойкости контактов происходят тогда, когда их поверхности трения в процессе работы обогащаются тонкой пленкой из золота, выделившегося из золотомедного сплава. В связи с таким эффектом В.Г. Куранов и Б.М. Кузьмиченко предложили предварительно обрабатывать фетром с маслом ВМ-4 рабочую поверхность золотомедного сплава (ЗлХ-0,5; ЗлХ-2,8) до получения на этой поверхности тонкой пленки золота толщиной 1...1,5 мкм.

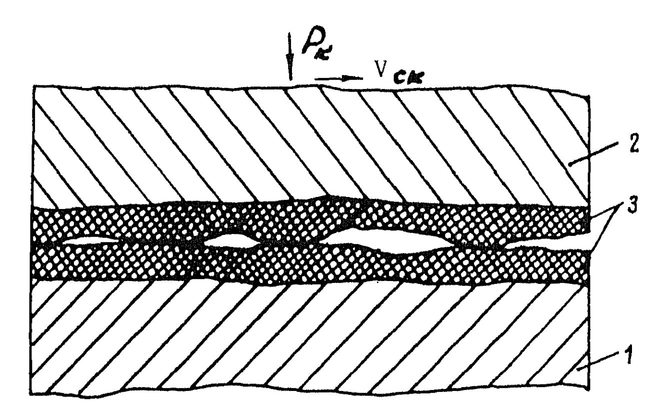


Рис. 2.46. **Физическая модель оптимальной контактной пары:**
1, 2 – основной металл (твердая основа); *3* – мягкие токопроводящие слои

В процессе работы образовавшийся слой золота переносится на щетку, размазывается по поверхности трения. Для проверки работоспособности контактов, на которых был предварительно образован слой золота технологической полировкой фетром, были проведены сравнительные испытания (табл. 2.15).

Таблица 2.15

Метод обработки	Износ щеток, мкм
Отжиг	17,6
Полировка фетром	4,1

Испытания показали более высокую износостойкость обработанных фетром колец по сравнению с отожженными.

15. Опыт применения избирательного переноса в промышленности Казахстана

Работа П.И. Корника, А.И. Лыбина, Г.А. Истомина

Инженеры П.И. Корник, А.И. Лыбин, Г.А. Истомин и др. с 1991 г. ведут работы по использованию эффекта избирательного переноса на промышленных предприятиях республики Казахстан. Создав Межотраслевую внедренческую фирму «Надежность и долговечность», указанные авторы разработали техническую документацию по сервисному обслуживанию узлов трения технологического оборудования, машин и оборудования производственных участков Акционерного общества Корпорация «КАЗАХМЫС».

Эта новая форма организации технического обслуживания охватывает следующие основные машины горнодобывающего и перерабатывающего оборудования: большегрузные погрузчики Caterpilar и TORO; автосамосвалы TORO и БелАЗ; буровые машины Paramatik, УБШ, СБУ и ПМЗШ; вентиляционные и насосные установки; рудоизмельчительные мельницы; дробильные комплексы; вагонетки и др.

В 2000 г. фирма «Надежность и долговечность» организовала совместно с российскими специалистами собственное производство композиций к маслам и смазкам, реализующие режим избирательного переноса при трении.

За короткий период времени были разработаны пластичная смазка «Медея» и полифункциональная присадка к минеральным маслам «Валена». Полученные положительные результаты от применения новых смазочных материалов позволили использовать их на предприятиях промышленных городов Казахстана.

Одновременно с работами по обслуживанию узлов трения машин и механизмов фирма занимается вопросами регенерации отработавших смазочных материалов и восстановления их эксплуатационных свойств в процессе эксплуатации. При этом обращается особое внимание на возможное использование в этих процессах металлоплакирующих добавок к маслам, реализующих эффект избирательного переноса при трении.

Необходимо отметить, что при новой форме обслуживания машин и механизмов в более короткие сроки эффективно используются новые достижения в области триботехники. Это ведет к снижению материальных расходов и трудозатрат за счет проведения технического обслуживания по состоянию узла трения. Прежнее техническое обслуживание машины на основе планово-предупредительной системы ремонта (ППР) не может дать таких экономических результатов.

И последнее. Фирма крайне заинтересована в повышении качества производства обслуживания узлов трения машин и механизмов. С этой целью она систематически повышает квалификацию своих сотрудников, покупая необходимую для них техническую литературу и проводя технические занятия.

Можно было бы порекомендовать Министерству по науке и промышленности России изучить опыт технического обслуживания машин и механизмов по состоянию, используемый в Акционерном обществе Корпорация «Казахмыс», и применить его на крупных промышленных предприятиях страны, таких как Уралмаш, Якуталмаз и др.

16. Сельскохозяйственная техника

16.1. Общие сведения

Проблема повышения ресурса сельскохозяйственной техники в нашей стране является весьма актуальной. В сельском хозяйстве эксплуатируется 1444 тыс. тракторов, 317,4 тыс. зерноуборочных комбайнов, 723 тыс. грузовых автомобилей и сотни тысяч другой сельскохозяйственной техники. Только одних двигателей внутреннего сгорания имеется в сельском хозяйстве более 2,5 млн. На ремонт тракторов и других сельскохозяйственных машин в 1993 г. было израсходовано 605 млрд рублей. Основные фонды в сельском хозяйстве составляют порядка 16% всех фондов страны.

Следует отметить, что основная часть сельскохозяйственной техники эксплуатируется после капитального ремонта. У техники, прошедшей капитальный ремонт, резко снижены ее эксплуатационные характеристики. Так, послеремонтный ресурс двигателей эксплуатирующихся в сельском хозяйстве, составляет только 30...50% ресурса новых двигателей. В период эксплуатации машин до капитального ремонта их двигатели подвергаются капитальному ремонту 2...6 раз. На долю запасных частей за срок службы двигателя приходится 75...115% стоимости нового двигате-

ля (70...120% его массы). Годовое число ремонтируемых двигателей сельскохозяйственного назначения превышает объем их производства. Анализ эксплуатации автомобилей показывает, что 34...45% отказов приходится на двигатели. После ремонта наработка на отказ у них снижается в 1,7...3,5 раза по сравнению с новыми. В связи с этим и производительность отремонтированных машин в среднем на 10...15% ниже, чем у новых машин.

Важнейшим направлением повышения ресурса сельскохозяйственной техники и снижения затрат на ремонт, по мнению ученых Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина, является разработка новых методов повышения ресурса машин, основанных на эффекте безызносного трения.

16.2. Работы д.т.н. проф., М.Н. Ерохина, д.т.н., проф. С.С. Некрасова, д.т.н., проф. В.В. Стрельцова, д.т.н., проф. В.Ф. Карпенкова, д.т.н. П.И. Носихина, д.т.н. В.И. Балабанова, к.т.н. Г.И. Эжиева

В Московском государственном агроинженерном университете им. В.П. Горячкина создана крупная научная школа по триботехнике сельскохозяйственных машин. Основным научным направлением школы является разработка новых триботехнологий, основанных на явлении избирательного переноса при трении (эффекта безызносности). Разработанные триботехнологии позволяют в значительной степени повысить ресурс машин, снизить расход горюче-смазочных материалов, сократить затраты на капитальный ремонт двигателей внутреннего сгорания и снизить концентрацию CO в выхлопных газах при работе двигателей.

Далее будут приведены некоторые результаты работ указанной научной школы.

Новая технология ФАБО. Для исследования эффективности нового метода ФАБО были проведены лабораторные исследования на образцах и гильзах, стендовые и эксплуатационные испытания гильз цилиндров на двигателях. Сущность метода состоит в том, что процесс нанесения тонкого слоя латуни на поверхность цилиндра производится обычным хоном с антифрикционными брусками МА, содержащими в качестве твердой смазки дисульфид молибдена. При натирании применяется медьсодержащая рабочая среда (состав № 7). На поверхности образуется тонкая пленка медьдисульфидмолибденового состава. Такое покрытие обеспечивает короткий период приработки цилиндра и поршневых колец и высокое сопротивление задиру поверхностей трения.

В качестве технологических рабочих сред при нанесении покрытий при ФАБО были использованы семь составов, выбранных на основании патентного и литературного обзора, а также подобранных в ходе исследований. Среднее содержание компонентов в рабочих средах приведено в табл. 2.16.

Таблица 2.16

Компоненты	Номера составов						
	1	2	3	4	5	6	7
Хлорид меди	5						
Глюкоза	3						
Оксид кремния	4						
Антраниловая кислота	—	—	—	—	5		
Гидрохинон	—	—	—	—	—	5	—
Глицерин	88	—	—	—	—	—	35
Вода	—	—	—	—	—	—	59
Эмулсол —	—	—	—	—	—	3	
Присадка ОГМ-1	—	100	80	60	95	95	—
Присадка МКФ-18	—	—	—	20	—	—	—
Присадка ЛЗ-309/2	—	—	20	20	—	—	—

Наличие эмульсола в составе № 7 способствует практически полному смыванию с обрабатываемой поверхности хлорида меди и глицерина, что позволяет отказаться от промывки деталей после обработки. Содержащиеся в эмульсоле компоненты способствуют удалению окисных пленок с обрабатываемой поверхности при воздействии антифрикционными брусками. Вода используется в качестве общего растворителя для компонентов состава.

Лабораторные испытания проводились на машине трения СМЦ-2 с применением самоустанавливающейся колодки. Образцы смазывались моторным маслом М8$В_1$. Ролики были выполнены из чугуна, близкого по химическому составу к материалу поршневых колец двигателя ЗМЗ-53, колодки были изготовлены из стали ст45. Режим проведения испытаний: число оборотов ролика $n = 500$ мин$^{-1}$; давление на ролик $F = 1200$ Н; продолжительность испытаний 120 мин для выбора наиболее эффективного покрытии и 70 ч для оценки качества покрытия в течение длительной работы.

На рис. 2.47 показано изменение износа образцов без покрытия и с медьдисульфидмолибденовым покрытием в течение длительного времени (70 ч).

Были проведены длительные стендовые испытания двух двигателей ЗМЗ-53 с четырьмя цилиндрами, обработанными по типовой (заводской) технологии и с четырьмя цилиндрами с медьдисульфидмолибденовым покрытием. Средние значения диаметральных износов цилиндров после 50-часовых испытаний приведены на рис. 2.48.

Стендовые испытания двигателей ЗМЗ-53 показали, что использование ФАБО позволяет повысить износостойкость цилиндров в 1,9... 2,3 раза. Износостойкость поршневых колец при этом повышается в 1,4...1,8 раза.

Эксплуатационным испытаниям были подвергнуты 48 двигателей ЗМЗ-53. Результаты испытаний показали, что средний межремонтный ресурс двигателей без покрытия цилиндров составляет 46215 км, а с покрытием – 60241 км.

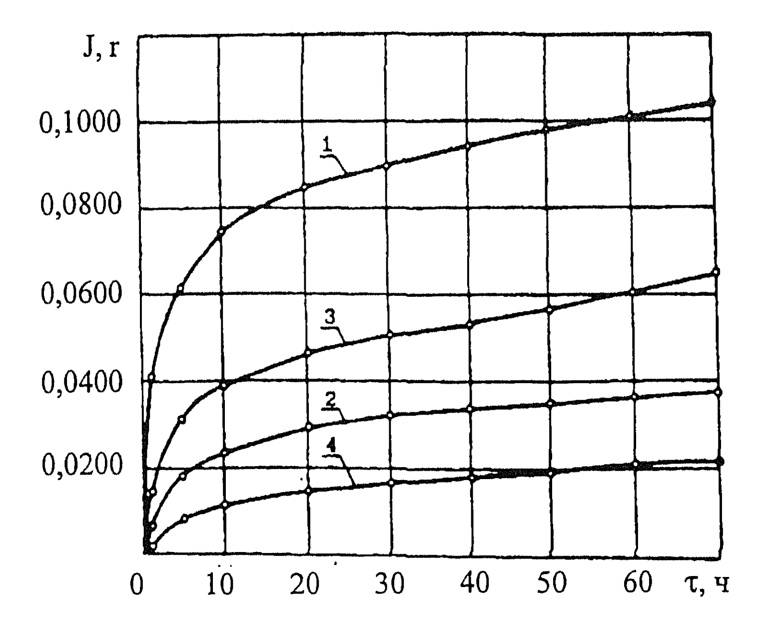


Рис. 2.47. **Измененне износа образцов от продолжительности испытаний:**
1 – колодка без покрытия; *2* – ролик, работающий в паре с колодкой без покрытия; *3* – колодка с медь-дисульфидмолибденовым покрытием; *4* – ролик, работающий в паре с колодкой с медьдисульфидмолибденовым покрытием

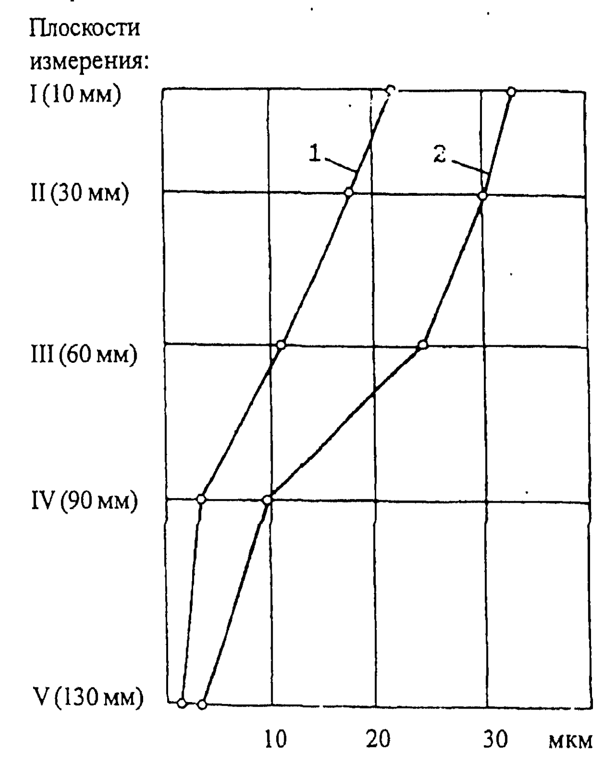


Рис. 2.48. **Средние диаметральные износы цилиндров двигателя ЗМЗ-53 по высоте после 50-ти часовых стендовых испытаний:**
1 – цилиндры с медьдисульфидмолибденовым покрытием; *2* – цилиндры без покрытия

Ускоренная ресурсосберегающая обкатка двигателей внутреннего сгорания. Известно, что высокое качество двигателей во многом обеспечивается правильной приработкой деталей. Приработка – это изменение геометрии поверхностей трения и физико-механических свойств поверхностных слоев материалов в начальный период трения, проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания (ГОСТ 23.992—78). Приработку деталей двигателей производят в период их стендовой обкатки на заводах и эксплуатационной обкатки в хозяйствах.

Обкатка – заключительная технологическая операция, качественное проведение которой позволяет уменьшить отказы в период эксплуатации и повысить ресурс двигателей. На обкатку автомобильного двигателя требуется 30... 40 ч, что соответствует 1000 км пробега автомобиля. Столь длительное время обкатки вызывает необходимость ее ускорения. Это возможно осуществить благодаря применению приработочных присадок, которые вводятся в двигатель с воздухом, топливом и добавляются к смазочному маслу, а также изменением режимов и условий проведения обкатки (нагрузки, частоты вращения, длительности режимов, температуры воды, масла).

Рассмотрение присадок по методу их доставки в зоны трения двигателя и их влияния на изнашивание поверхности показало, что присадки к воздуху и топливу более эффективны при использовании для приработки деталей цилиндропоршневой группы, а присадки к маслу – для приработки деталей кривошипно-шатунного механизма. Учитывая, что присадки к топливу ограничены применением (не охватывают периода холодной обкатки, вызывают повышенное нагарообразование), в работах указанных выше специалистов, использовались присадки только к воздуху и маслу.

Приработочные присадки по их воздействию на трущиеся поверхности можно разбить на следующие группы: инактивные, трибополимеризующие, поверхностно-активные, химически-активные, реализующие избирательный перенос при трении. Наибольший интерес представляла последняя группа присадок, позволяющая в зависимости от условий трения, ускорять приработку или реализовать почти безызносное трение.

Металлоплакирующие присадки к воздуху ранее не были разработаны, хотя имелись сведения о добавлении к воздуху четыреххлористого олова. Однако эта присадка чрезвычайно токсична. В Московском государственном агроинженерном университете им. В.П. Горячкина были разработаны металлоплакирующие присадки к маслу: ОГМ-1,2,3; ОМХ-2; ОМО-5; ОМО-10 и др. (А.С. № 1201297, 1456453, 1531464, 1621500, 1759859, 1811534, патент № 2041247); присадки к воздуху: АЛП-ПМС, ОГМ-С, ОМХ-С. Основой присадок является олеиновая кислота – 80...95% и металлоорганические соединения металлов (медь, хром, молибден, олово, цинк).

При применении металлоплакирующих присадок образующаяся сервовитная пленка на поверхностях трения деталей при обкатке двигателя приводит к снижению расхода мощности на трение и интенсивности из-

нашивания. Таким образом, применение присадок типа ОГМ, ОМХ способствует, с одной стороны, ускорению приработки, с другой – снижению износа деталей.

Возможность увеличения частоты вращения коленчатого вала и нагрузки при обкатке двигателя на масле с присадкой ОГИ-3 определяли многофакторным экспериментом. В результате получены данные по изменению момента силы трения (рис. 2.49). Их анализ показал, что при использовании присадки ОГМ-3 момент силы трения уменьшается, что дает возможность увеличить частоту вращения до 90%, нагрузку – до 30% по сравнению с этими параметрами при обкатке на чистом масле М-8-$Б_{-1}$.

Для повышения качества приработки деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя разработан способ (А.С. № 1778165), обеспечивающий ускорение приработки с помощью присадки ОГМ-С, подаваемой в зону трения деталей с потоком всасываемого воздуха в период холодной обкатки двигателя (рис. 2.50).

Этот способ в ряде случаев может заменить операцию ФАБО цилиндров, требующий дополнительного оборудования и времени в технологическом процессе ремонта двигателя.

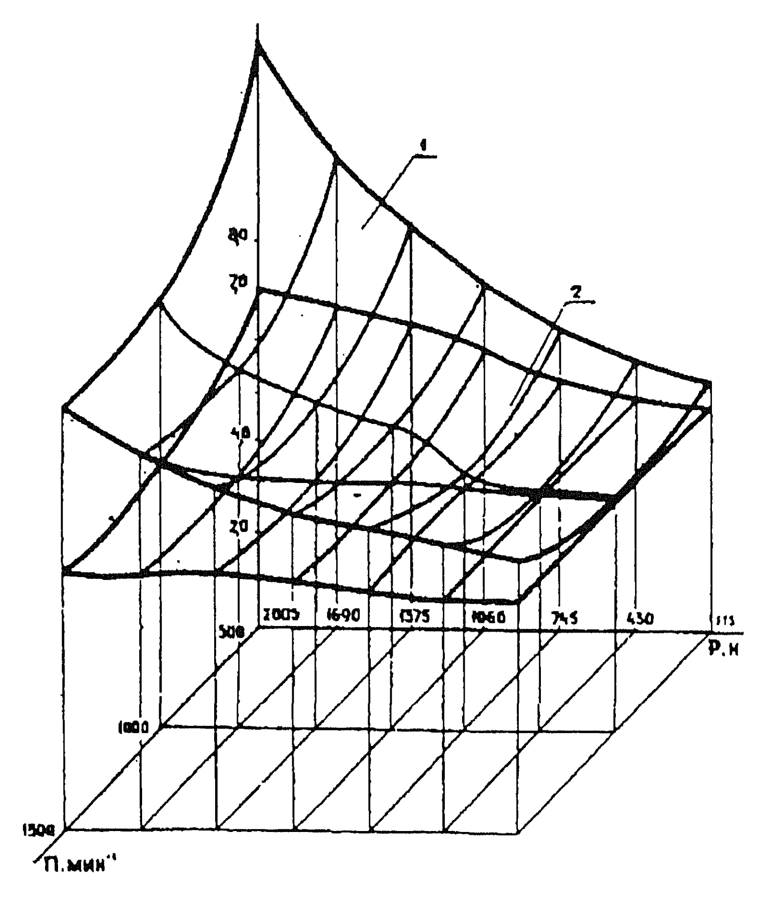


Рис. 2.49. **Изменение момента трения от нагрузки и частоты вращения вала:**
1 – на масле М-8-$Б_{-1}$; 2 – на масле М-8-$Б_{-1}$ с присадкой ОГМ-3

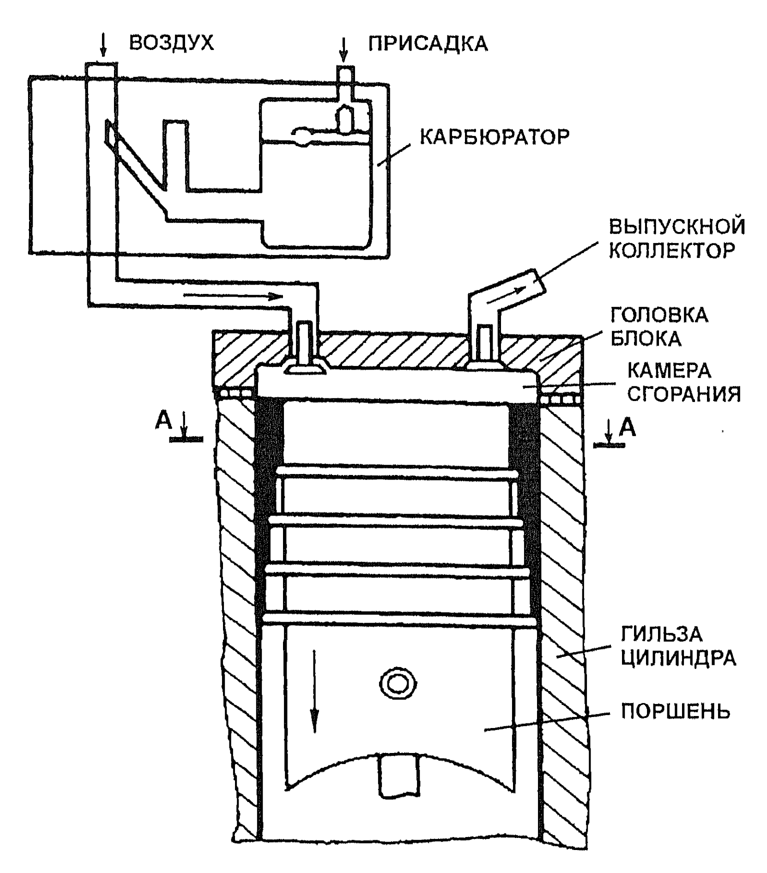


Рис. 2.50. **Схема способа повышения качества приработки деталей ЦПГ двигателя**

Испытания различных приработочных составов показали, что для ускорения приработки более эффективным является применение хлористой меди. В этом случае достигается наиболее интенсивное снижение момента силы трения (в 1,54 раза по отношению к начальному значению). Площадь приработки достигает 90% всей поверхности трения. Противозадирная стойкость деталей после приработки на масле М-8-В + 2% присадки ОГМ-3 увеличивается и достигает значений в 8,5 раза больших, чем после приработки на только одном масле М-8-В.

Износ деталей цилиндропоршневой группы двигателей после их обкатки на масле И-Г-А-68 наибольший по сравнению с износом при работе на других маслах. Добавление присадок ОГМ-3 к маслу приводит к снижению приработочных износов, причем чем меньше исходных присадок в стандартном масле, тем выше эффективность приработочных присадок. При ускоренной обкатке на маслах с металлоплакирующей присадкой ОГМ-3 средние износы деталей цилиндропоршневой группы в 1,6...3,2 раза ниже, чем при типовой обкатке на стандартном масле.

Эффективная мощность двигателя и удельный расход топлива зависят от применяемых приработочных составов. Проведен эксперимент, в

ходе которого при условной нагрузке на двигатель P = 300 Н и начальной частоте его вращения n = 2400 мин$^{-1}$ следили за изменением n в течение 5 мин. Результаты наблюдений приведены в табл. 2.17.

Таблица 2.17

Эффективная мощность и расход топлива

Приработочный состав	Частота вращения, мин	Эффективная мощность, кВт	Расход топлива	
			часовой, кг/ч	удельный, г/кВт · ч
1. Масло М-8-В	2500	56,3	20,0	355
2. М-8-В+ 2% присадки ОГМ-3	2600	58,5	17,6	301
3. М-8-В +1,5% присадки КТЦМС-1	2550	57,3	18,5	323
4. Масло М-Г-А-68 + 2% присадки ОГМ-3	2500	56,3	19,2	341
5. Масло ОМД-8	2500	56,3	17,5	311

Анализ результатов показал, что наибольшая эффективная мощность и наименьший расход топлива (снижение на 8,5%) получены после обкатки двигателя на масле М-8-В + 2% ОГМ-3. Металлоплакирующая присадка КТЦМС-1 также способствует увеличению мощности двигателя, однако удельный расход топлива при этом снижается меньше, чем при использовании присадки ОГМ-3.

Анализ профилограмм поверхностей трения гильз цилиндров показал, что уже после 30 мин обкатки на масле М-8-В + 2% ОГМ-3 шероховатость поверхности достигает значений, сравнимых с шероховатостью поверхности гильз, поступающих в ремонт после их эксплуатации. На шейках коленчатого вала в местах трения образуется антифрикционная пленка меди, обеспечивающая защиту основного металла вала от задиров и схватывания в начальный период эксплуатации.

Экспериментами установлено, что срабатывание присадки ОГМ-3 происходит наиболее эффективно в первые 20 ч эксплуатации двигателя, затем ее содержание (по меди) стабилизируется. Одной заправки присадки достаточно для обкатки 14 двигателей.

Проведенные исследования позволили авторам работы разработать технологические процессы ускоренной обкатки отремонтированных двигателей ГАЗ-52-01, ГАЗ-52-04, ЗМЗ-53-11, ЗМЗ-66-11, ЗМЗ672-11 и ЗИЛ-130. Время стендовой обкатки сокращается до четырех раз, а эксплуатационной — до пяти. Для примера в табл. 2.18 приведены режимы обкатки двигателей с применением присадок ОГМ-3 для двигателей типа ЗМЗ.

Таблица 2.18

Режимы ускоренной обкатки двигателей ЗМЗ-52-11, ЗМЗ-66-11, ЗМЗ-672-11

Этапы обкатки	Частота вращения, мин$^{-1}$	Нагрузка (по шкале стенда), Н	Время обкатки, мин
Холодная	600		5
	700		5
Горячая без нагрузки	1000		2
	1400		3
Горячая под нагрузкой	1600	190	2
	1600	210	2
	1700	240	2
	1800	290	3
	2000	330	3
	2100	350	3
			Всего: 30

На основании исследований разработано руководство РД.10. Россия. 01.0010-92 по ускоренной обкатке отремонтированных двигателей; оно согласовано с ГОСНИТИ, НИИАТ, Росагропромстандартом, АО “Росагрореммаш” и утверждено Минсельхозпроде РФ.

Обкатка дизелей. Полная приработка дизелей является длительным процессом (до 60 ч), и ремонтные заводы не в состоянии проводить процесс обкатки до конца. Основная часть приработки (40...60 ч) дизелей осуществляется в эксплуатации с ограниченными на 25% нагрузками, что не всегда возможно, особенно в период интенсивных полевых работ. В связи с этим важно сократить обкаточный период дизелей, завершая его в основном на ремонтных предприятиях.

Учеными Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина разработаны технологические процессы ускоренной обкатки дизелей на обкаточном масле ОМД-8 с присадкой АЛП-ПМС к воздуху. Обкаточное масло ОМД-8 (ТУ 38.40123—87) в качестве приработочной присадки содержит маслорастворимое соединение молибдена (дитиофосфат молибдена). Присадка АЛП-ПМС разработана в МГАУ и состоит из присадки АЛП-4Д и сульфонатной присадки ПМС и вводится в воздушный коллектор дизеля.

Режимы обкатки дизелей ЯМЗ и Д-240 по ускоренной и типовой технологии даны в табл. 2.19.

Удельный расход топлива у дизелей, обкатанных по ускоренной технологии, на 4...5% меньше в сравнении с дизелями, обкатанными по типовой технологии. Присадка АЛП-ПМС не оказывает отрицательного действия на детали топливной аппаратуры. Процессы ускоренной обкатки дизелей ЯМЗ-238 и Д-240 внедрены на ряде ремонтных заводов РФ.

Использование эффекта безызносности в картофелеуборочных машинах. Низкая надежность сельскохозяйственной техники вынуждает механизаторов много времени уделять техническому обслуживание и ре-

Таблица 2.19

Режимы работы дизелей по типовой и ускоренной обкатке

Обкатка	Частота вращения коленчатого вала, мин		Тормозной момент, Н · м		Время обкатки, мин			
					типовая технология		ускоренная технология	
	ЯМЗ	Д-240	ЯМЗ	Д-240	ЯМЗ	Д-240	ЯМЗ	Д-240
Холодная	800	500/600	—	—	5	10	5	10
	1200	700/800	—	—	10	10	5	10
	1400	900/950	—	—	5	10	5	10
Горячая на холостом ходу	1500	1000	—	—	15	5	10	5
	1700	1400/1800	—	—	15	10	5	5
	2380	—	—	—	5	—	5	
Горячая под нагрузкой	При полной	300	44	20	10	10	5	
	подаче	360	63	20	10	10	5	
	топлива	610	98	20	15	10	10	
	750	165	20	20	5	5		
	—	200	—	20	—	5		
	220	—	5	—	5			
Всего, мин	—	—	130	130	65	80		

монту. Например, при уборке картофеля лишь 56% времени смены комбайн работает, а остальное время уходит на устранение отказов и техническое обслуживание. Уборка и производство картофеля составляет около 60% всех трудозатрат в сельском хозяйстве. Механизированная уборка картофеля производится лишь на 45...47% площадей.

Трудности при создании картофелеуборочной техники обусловлены тем, что ни одна другая сельскохозяйственная машина не перерабатывает столь большие массы материала. С каждого гектара через комбайн проходит более тысячи тонн почвы. Свойства почвы по влажности, абразивному и химическому составу разнообразны, а клубни очень восприимчивы к механическим повреждениям. С увеличением влажности увеличивается прилипаемость почвы к рабочим органам, что приводит к отказам и даже невозможности использования комбайнов.

Наибольшее количество отказов по комбайнам приходится на основной элеватор с лемехом (16,7%), ботвоудалитель (14,3%), комкодавитель (33,5%). Из-за низкой надежности этих узлов вероятность безотказной работы комбайнов не превышает 0,25. Более 90% подшипников качения при ремонте выбраковываются из-за чрезмерного их износа. Отказы вызываются и другими причинами: забивание рабочих органов растительной массой, залипанием почвой с увеличением ее влажности, ослаблением болтовых и других неподвижных соединений. Изнашивание сопряжения вал — уплотнение приводит к увеличению утечки смазки и, как

следствие, к загрязнению почвы нефтепродуктами, к попаданию абразива в зону трения подшипников и их быстрому износу.

Реализация эффекта безызносности в сопряжении вал—втулка. Как показали исследования, расход уплотнений для картофелеуборочной техники в 2...3 раза превышает их нормы. Практически 100% уплотнений при капитальном ремонте комбайнов подлежат замене и у 70% валов требуется восстановление рабочих поверхностей в зоне контакта с уплотнениями. Износ валов в этой зоне достигает 0,3...0,5 мм. Исследования показали, что 90% аварийных разрушений подшипниковых узлов связано с неудовлетворительной работой уплотнений.

Одной из основных причин интенсивного изнашивания уплотнений, по мнению специалистов, является прилипание их рабочих кромок к поверхности вала в состоянии длительного покоя и, как следствие, резкое увеличение момента трения в период разгона.

Авторы предложили метод комплексного воздействия на соединение "вал—манжетное уплотнение", заключающийся в нанесении на трущиеся поверхности соединения металлосодержащих покрытий и введения в смазочные материалы металлорганических присадок. Поверхность стального вала подвергалась ФАБО, а на рабочую поверхность резинового уплотнения наносилась металлосодержащая композиция, содержащая дисперсную медь или ее оксиды. Специфичность задачи заключалась в надежном фиксировании дисперсных частиц меди на поверхности материала уплотнения, сформированного на основе бутадиеннитрильного каучука.

Для сохранения комплекса эксплуатационных свойств уплотнения при его модификации жесткими частицами подбирали композиции исходя из условий не только обеспечения повышенной адгезии к каучуку и высокой износостойкости рабочей кромки уплотнения, но и сохранения их релаксационных свойств, маслобензостойкости, морозостойкости, стабильности и свойств при хранении.

Сравнительный анализ различных материалов и их композиций, выпускаемых промышленностью, показал, что указанным условиям лучше всего удовлетворяет композиция на основе изоцианатного мономера с легирующими добавками лакопролов с различной молекулярной массой и функциональностью, в частности ООПГ 1052, 2002,3003, 5003. В качестве наполнителя был выбран медный порошок дисперсностью 20...100 мкм. Содержание наполнителя – 4...5 %.

Стендовые испытания модифицированных манжетных уплотнений при смазывании их трансмиссионным маслом показали положительные результаты. Пусковой момент трения уменьшился в 3 раза (рис. 2.51), а износ за 150 ч испытаний снизился в 2,9 раза (рис. 2.52), при этом утечки масла через уплотнение уменьшились в 2,6 раза.

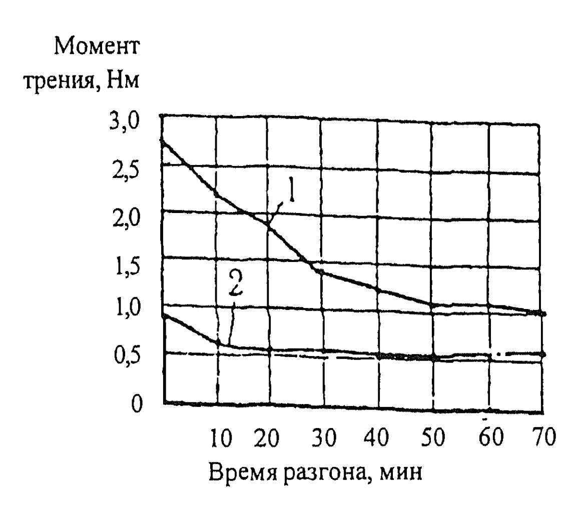


Рис.2.51. **Изменение момента трения в соединении " вал—уплотнение" в процессе разгона:**
1 – сталь 45 – серийная манжета; 2 – сталь 45 латунированная манжета с металлсодержащим покрытием на рабочей кромке

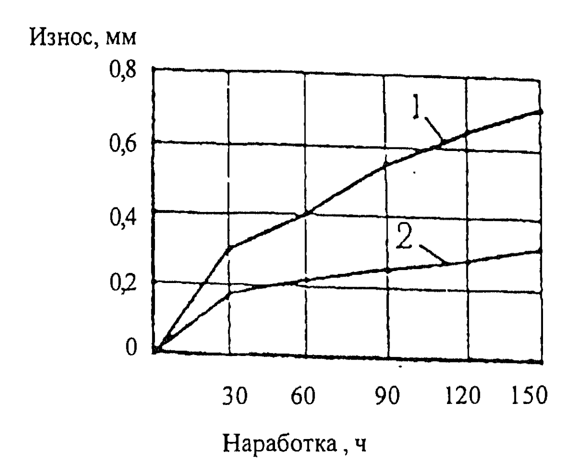


Рис. 2.52. **Зависимость износа соединения "вал—уплотнение" от наработки в мм:**
1 – сталь 45 – серийная манжета; *2* – сталь 45 латунированная – манжета с металлсодержащим покрытием на рабочей кромке

Для ремонтных предприятий Министерства сельского хозяйства и продовольствия разработано руководство по нанесению медьсодержащих покрытий на рабочую поверхность манжетных уплотнений и условиям их дальнейшей эксплуатации (РТМ 10.0019—94).

Глава 3. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АНТИФРИКЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ИСПЫТАНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. Общие замечания

Наиболее полную оценку износостойкости материала применительно к конкретным условиям работы узла трения могут дать испытания деталей в эксплуатации машин или на установках, полностью имитирующих условия службы. Но и такая оценка материала не позволяет выявить те основные физико-механические свойства материалов, которые определяют их износостойкость.

Часто при выборе материалов для трущихся деталей при конструировании машины, а также ее ремонте или изыскании способов повышения износостойкости приходится применять лабораторные исследования. Лабораторные исследования проводятся и при разработке новых конструкционных материалов, тонких металлических и полимерных покрытий для выявления наиболее целесообразных областей их использования. В большинстве случаев лабораторные исследования по определению антифрикционных свойств нового материала проводятся в сравнении с каким-либо известным материалом, обладающим хорошо изученными антифрикционными и прочностными свойствами. Сравнительные испытания проводятся при исследовании и разработке новых смазочных материалов.

Для деталей, восстанавливаемых при ремонте тонкими износостойкими и антифрикционными покрытиями и работающими в условиях отсутствия агрессивной среды, высоких температур и абразива, важными являются следующие антифрикционные и прочностные свойства покрытий [2].

Антифрикционные свойства: износостойкость покрытия; его прирабатываемость; способность покрытия при работе выдерживать необходимые удельные давления; длительно работать после выключения подачи смазки; давать низкие коэффициенты трения в диапазоне рабочих условий эксплуатации; противостоять схватыванию и заеданию.

Прочностные свойства: способность покрытия сопротивляться циклическим контактным нагрузкам и динамическим ударным нагрузкам; прочность сцепления покрытия с основным материалом; способность покрытия противостоять повторным пластическим деформациям.

Испытания смазочных материалов. В настоящее время еще не существует общепризнанных количественных показателей, характеризующих противоизносные и антифрикционные свойства смазочных материалов. Поэтому чаще всего производят сравнительные испытания смазочного материала с эталоном. В качестве последнего может быть выбран любой, достаточно проверенный в практических условиях смазочный материал, по своему назначению близкий к испытуемому.

Принято испытания смазочных материалов разбивать на следующие последовательные этапы.

1. Отборочные испытания — кратковременные испытания образцов в лабораторных условиях на машинах трения при смазывании эталоном и новым смазочным материалом;

2. Стендовые полигонные испытания — продолжительные испытания с имитацией эксплуатационных условий в процессе смазки реальных узлов и машин. Испытания проводятся на стендах в лабораторных условиях или на полигонах в полевых и дорожных условиях при строго регламентированных режимах испытаний.

3. Эксплуатационные испытания — длительные испытания в процессе смазки реальных машин, представляющие завершающий контрольный этап проверки смазочного материала, успешно выдержавший предыдущие испытания [20].

При разработке новых смазочных материалов обязательны все три этапа испытаний. При испытании смазочного материала потребителями в большинстве случаев ограничиваются первым (отборочным) этапом испытаний смазочного материала.

При проведении лабораторных испытаний смазочных материалов целесообразно определить следующие их характеристики: коэффициенты трения в зависимости от скорости скольжения, удельного давления и температуры; максимальную нагрузку до заедания; способность работы трущейся пары длительно работать после выключения смазки и др. Смазочный материал необходимо испытывать с различными парами из конструкционных материалов, например пары сталь—сталь и сталь—бронза и др.

Установить связь между износостойкостью того или иного конструкционного материала и его механическими свойствами не удается и это практически невозможно, так как износостойкость материала зависит не только от его собственных свойств, а и от свойств сопряженного тела и смазочного материала.

Как отмечалось еще на 1-й Всесоюзной конференции по трению и износу в 1939 г. Е.М. Розенбергом [19], "величина износа определяется в первую очередь "внешними" факторами: 1) родом и характером трения; 2) величиной удельного давления между трущимися поверхностями и характером приложения нагрузки; 3) скоростью взаимного перемещения трущихся поверхностей и режимом изменения скорости во времени; 4) способом подвода, количеством и качествами смазки (вязкость, адсорбционная способность, характером изменения этих свойств с температурой и давлением и пр.); 5) температурными условиями; 6) коррозирующими воздействиями и качествами образующихся поверхностных пленок; 7) присутствием абразивов, их качественной и размерной характеристикой; 8) степенью и характером удаления продуктов износа; 9) формой и размером трущихся поверхностей, определяющими условия трения, охлаждения, подвода смазки и т.д.; 10) начальным состоянием поверхностей и пр.". "Не малое значение имеет общая гамма физико-механических, химических и физико-химических свойств самих трущихся материалов, как, например, механические свойства, выкрашивание включений, служащих смазкой или, наоборот, абразивом, способность принимать наклеп, «прирабатываемость», способность адсорбировать смазку и т.д. Эти свой-

ства должны быть рассматриваемы не сами по себе, но в их сложном сочетании при комбинации разнородных материалов в трущейся паре".

Академик В.Д. Кузнецов [14] критически отнесся к высказыванию Е.М. Розенберга. Он считает, что если все это учитывать, то износостойкость материала нам никогда не определить из-за сложности эксперимента. Б.Д. Кузнецов считает: "Задача научного исследования и заключается в том, чтобы исследовать явление не во всей его сложности, а в упрощенном виде, когда из всех, влияющих на это явление факторов, изменяется только один, а остальные остаются неизменными".

При проведении лабораторных исследований по оценке износостойкости материалов с целью сокращения времени испытаний исследователи часто увеличивают удельное давление и скорость скольжения по сравнению с теми, которые имеются в реальных условиях работы узла трения. При таких ускоренных испытаниях износостойкость материала может быть получена в течение нескольких часов или минут. Как указывается в работе В.Д. Кузнецова [14], результаты ускоренных испытаний могут оказаться не верными. Это связано с тем, что износ материала очень сильно зависит от температуры трущихся поверхностей, а эта температура по теоретическим и экспериментальным исследованиям пропорциональна давлению и скорости движения. Следовательно, ускорение процесса износа, т.е. ускоренный метод исследования, связано с повышением температуры поверхностей трения, а это существенно влияет на износ. Если бы температурный ход износа был одинаков для всех металлов, то экстраполяция на нормальные условия работы имела бы некоторые основания [14].

Для оценки антифрикционных свойств материалов и покрытий имеется много машин, установок и приборов. Почти каждый исследователь сконструировал свою собственную или несколько машин, иногда довольно сложных.

Описание машин трения и их классификация даны в работах [8, 10,12, 14, 21]. Здесь необходимо отметить, что академик В.Д. Кузнецов на основании анализа многих испытательных машин по изучению трения и износа материалов пришел к выводу, что "простая установка, состоящая из вращающегося диска и прижимаемого к нему тела с приспособлением для измерения силы трения, дала ряд весьма ценных, принципиально важных результатов. Ни одна другая установка не внесла в науку столь определенных результатов и мне кажется, что часто конструкторы машин идут по неправильному пути, усложняя конструкцию машины, тем самым усложняя процесс явления износа. Мне кажется, что простая установка может дать в вопросах трения и износа еще значительно больше, чем она дала. Эта установка имеет то преимущество, что она дает возможность: 1) в широком интервале изменять скорость и нагрузку; 2) измерять силу трения, коэффициент трения и работу трения; 3) исследовать сухое трение и трение со смазкой; 4) исследовать случай износа при трении об абразив или случай износа металла о металл; 5) вести исследование при различных температурах; 6) определять температуру поверхности трущихся тел; 7) определять удельный износ, т.е. массу или объем со шлифованного слоя на единицу работы".

В связи с такой высокой оценкой академиком В.Д. Кузнецовым машины трения АЕ-5 описание машин трения начнется с нее. Кроме того, описаны другие машины и установки, используемые в НИИ-13 Министерства обороны и НИИ гражданской авиации при исследовании антифрикционных и прочностных свойств тонких металлических покрытий, оценки служебных свойств смазочных материалов и при проведении анализа причин летных происшествий.

2. Методы оценки антифрикционных материалов

2.1. Определение износостойкости

Для оценки этой характеристики целесообразно использовать машину трения АЕ-5, сконструированную еще в 30-е годы проф. А.В. Аничковым и доц. Л.В. Елиным [7].

Машина трения АЕ-5 построена на принципе торцевого трения трех цилиндрических образцов по плоскую сторону эталонного диска. Благодаря возможности менять эталонный диск и образцы можно осуществлять комбинацию двух любых трущихся материалов. Для нагрузки образцов определенным давлением в машине применен рычаг с соотношением плеч 1: 10, что дает возможность изменять удельные давления от 2 до 20 МПа. На машине имеется динамометр, регистрирующий момент трения во время опыта, это позволяет определить коэффициент трения испытуемой пары. Для изменения скорости скольжения образцов служат сменные шкивы от электромотора к вращающемуся эталонному диску. Кроме того, скорость можно изменять установкой образцов на различных радиусах, для чего в головке имеются соответствующие пазы. В случае необходимости сохранять в опытах необходимую температуру трения постоянной ее регулируют охлаждением диска водой или подогревом головки при помощи намотанной на нее спирали электрогрелки. Для смазки образцов имеется масленка, которая подает строго дозированное количество масла в центр вращающего диска. Благодаря силам инерции масло растягивается в тонкую пленку и подается в зону трения образцов.

С 1986 г. машина трения АЕ-5 гостирована: ГОСТ 23.224-86 “Обеспечение износостойкости изделий. Методы восстановления деталей” М. — Стандарты 1986. С. 28.

Схема машины трения АЕ-5 представлена на рис. 3.1.

Величина износа материалов определяется методом взвешивания образцов на аналитических весах до испытания и после него.

Перед испытанием на изнашивание три цилиндрических образца, закрепленные в головке машины, притираются по чугунной плите, а затем прирабатываются с испытуемым диском, после чего вынимаются из головки, промываются и взвешиваются. На место образцы устанавливаются по меткам.

Исследования показали, что при соблюдении постоянных условий испытаний и достаточной их длительности разброс данных величин износа невелик и составляет 15%.

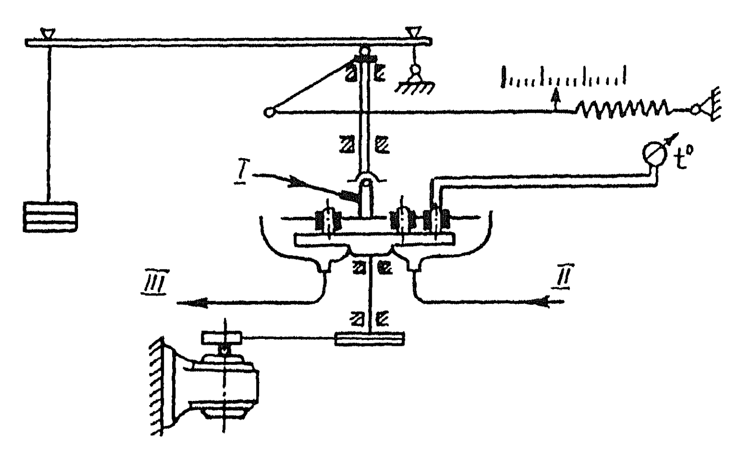


Рис. 3.1. **Машина трения АЕ-5:**
I — подвод масла; *II* — подвод воды для охлаждения образцов; *III* — отвод воды

Технические данные машины трения АЕ-5:
Привод — 1 кВт.
Габариты — 320×160×560 мм.
Масса — 80 кг.
Скорость вращения диска — до 300 об/мин.
Диаметр верхних образцов (неподвижных) 6 мм; высота образцов 10 мм.
Диаметр вращающегося диска 80 мм; толщина диска 1,5 мм.

2.2. Оценка прирабатываемости материалов и покрытий

Способность к приработке материалов или износостойких покрытий возможно оценить на машине трения АЕ-5. Так, например, была произведена оценка способности к приработке гальванического пористого хрома в зависимости от характера пористости и гладкого хрома (без пористости). Испытывались три стальных цилиндрических образца из стали 40ХНМА с твердостью HRC = 32, диаметром рабочей части 2,5 мм при трении о стальные кольца, покрытые гладким хромом и хромом с различной сеткой пористости.

Общая площадь трения трех образцов составляла 0,146 см^2, что позволяло производить нагружение до 1000 кг/см^2. Испытания проводились с постоянной скоростью скольжения образцов 8,5 м/с, при температуре 60°С и строго дозированной подаче смазки — 1 капля в 6 с. Перед испытанием стальные хромированные кольца зачищались наждачным по-лотном и тщательно промывались. При испытании на нагрузочный рычаг машины через каждые 4 мин добавлялась нагрузка на образцы в 200 г до начала резкого повышения момента трения. Величина нагрузки, соответствующая этому моменту, условно считалась нагрузкой начала заедания; она характеризовала способность хромового покрытия к приработ-

ке. Ниже приведены величины нагрузок (в кг/см^2) начала заедания, полученные при трех испытаниях двух видов хромового покрытия.

Хром с точечной пористостью	780;	780	600
Гладкий непористый хром	75;	65	65

Из этих данных видно, что непористый хром обладает значительно меньшей способностью к приработке [3].

2.3. Способность материала или покрытия длительно работать при выключении подачи смазки

В связи с тем, что в практике возможны случаи перерыва в подаче смазки к трущимся поверхностям, важно установить, как поведет себя антифрикционный материал или покрытие при таких условиях. На рис. 3.2 представлены графики, показывающие изменения коэффициента трения при работе после выключения смазки, полученные при испытании на машине трения АЕ-5 двух видов хромового покрытия.

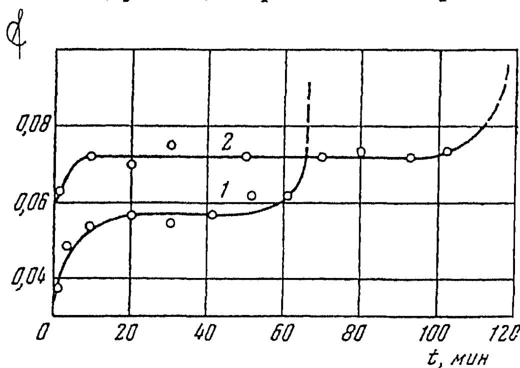


Рис. 3.2. **Изменение коэффициента трения от времени с момента выключения смазки:** *1* – хром по накатанной поверхности; *2* – хром пористый

Цилиндрические образцы были чугунные, предварительно приработанные. Кольца были хромированы двумя видами хрома. Испытания велись при скорости скольжения 8,5 м/с и давлении на образцах 60 кг/см^2.

2.4. Определение предельных нагрузок

Предельные для материала или покрытия нагрузки возможно определить на машине трения АЕ-5, а также на машине с возвратно-поступательным движением 77 МТ-1 (машина была сконструирована в 1950 г. А.А. Поляковым и Д.Н. Гаркуновым) [16].

Машина трения 77 МТ-1 состоит из трех агрегатов: электродвигателя, редуктора и собственно машины трения. Кинематическая схема приведена на рис. 3.3.

На машине можно изменять условия смазки образцов, нагрузку, а также температуру и рабочую среду. Для этого в машине предусмотрены дозировочное устройство для подачи смазки к образцам, узел нагрузки и помещение для термоэлементов, повышающих раздельно температуру

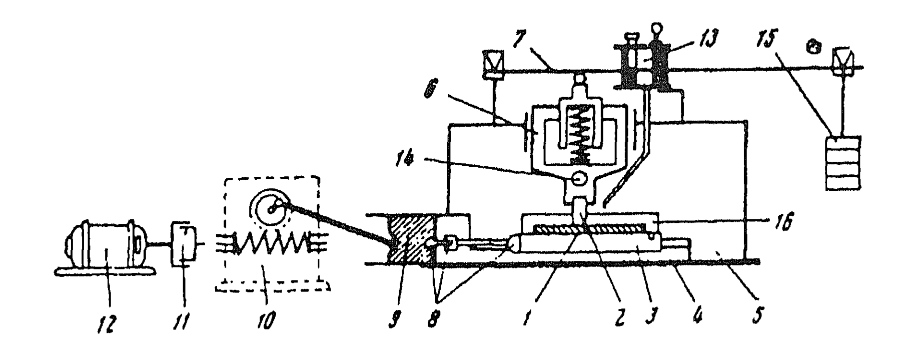


Рис. 3.3. **Машина трения 77 МТ-1:**
1 — образец из цилиндра; *2* — образец из поршневого кольца; *3* — ползун; *4* — направляющая; 5 — корпус машины; 6 — шток; *7* — рычаг нагрузки; *8* — шарниры; *9* — крейцкопф; *10* — редуктор; *11* — муфта; *12* — электромотор; *13* — масленка; *14* — нагревательный элемент; *15* — груз; *16* — ванна для смазки

верхнего и нижнего образцов при испытаниях. Узел трения заключен в металлический корпус с патрубками для подвода газовой среды (азота, аргона, отработанных газов и др.). Наблюдение за подачей смазки осуществляется через окно из органического стекла в корпусе машины. Конструкция машины допускает установку как образцов, вырезанных из поршневого кольца (рис. 3.4, *а*) и цилиндра (рис. 3.4, *б*), имеющих форму участка цилиндрической поверхности, так и плоских. Вращение от электродвигателя через муфту передается на червячный редуктор, на выходном валу которого укреплен диск. В диске эксцентрично укреплен палец, сообщающий через шатун возвратно-поступательное движение крейцкопфу (рис. 3.3).

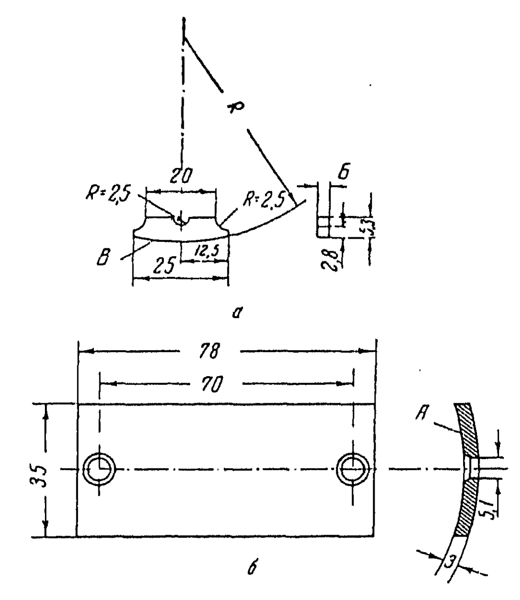


Рис. 3.4. **Образец для испытания на износ к машине трения 77 МТ-1. Поверхности *А, Б, В* не обрабатываются**

Крейцкопф шарнирно соединен с ползуном *3*, на котором двумя винтами крепится образец *1*. Ползун движется по направляющей *4*. Благодаря шарнирному соединению *8* и цилиндрической форме сечения направляющей ползун имеет возможность ориентироваться по неподвижному верхнему образцу *2*, закрепленному в детали *6*, которая двигается только вертикально (перпендикулярно движению ползуна).

Узел нагрузки состоит из рычага *7* с соотношением плеч 1: 5, груза *15* и детали *6*, передающей усилие на образцы. Верхний образец *2* крепится к детали *6* планкой, прижимаемой тремя винтами.Смазка подается по трубке каплями. Предусмотрена система смазки трущихся деталей машины. В детали *6* имеется сверление *14*, в котором помещается термоэлемент для нагрева верхнего образца; в ползуне сделано сверление для нагрева нижнего образца. Температура образцов измеряется медно-константановыми термопарами, вставленными в миллиметровые отверстия в торцевой части образцов.

Технические данные машины трения 77 МТ-1:
Привод — 1 кВт
Габариты — 1300×350×250
Масса — 90 кг
Нагрузка на рычаг — максимальная 20 кг
Число двойных ходов ползуна — 108 мин.

При необходимости испытания образцов в проточном масле ванна для смазки *16* убирается. Отработанное масло стекает в банку, расположенную в корпусе машины.

По сравнению с другими схемами машин трения с возвратно-поступательным движением применение ползуна с большим числом степеней свободы позволяет ускорить приработку образцов, имеющих плоскую или вогнутую поверхность в случае испытания образцов, вырезанных из цилиндра и поршневых колец двигателя. Кроме того, съемка и вторичная установка образцов в машину производится без дополнительной приработки.

Исследование износа при возвратно-поступательном движении образцов с тонкими покрытиями до 0,1 мм (анодных, сульфидных пленок и т.п.) без самоустанавливающегося ползуна весьма затруднено и для таких покрытий, как оксидирование, невозможно.

При исследовании износа чугунных образцов в паре с хромовым покрытием на машине трения 77МТ-1 при температуре 30...40°С, нагрузке 60 кг/см^2 и смазке одной капли масла в 10 мин было замечено, что для различных типов хромового покрытия весовой износ хромированного образца неизменно превышал износ чугунного в 4...5 раз. При этом, естественно, линейный износ хромированного образца, вырезанного из цилиндра, был в десятки и более раз меньше чугунного образца, вырезанного из поршневого кольца. Было установлено, что при повышении температуры отношение величины весового износа чугунного образца к величине износа хромированного образца изменяется. На рис. 3.5 показано изменение этого соотношения с изменением температуры образцов.

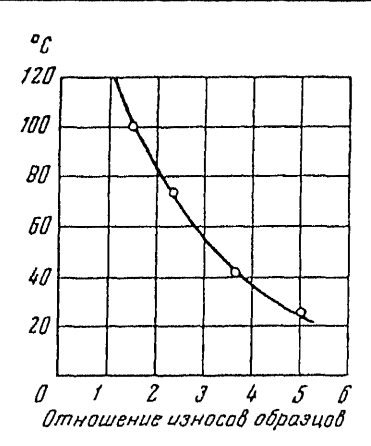


Рис 3.5. **Изменение отношения между износом чугунного и хромированного образцов при повышении температуры испытания**

Проведенные ранее исследования [1] показали, что величины весовых износов двух сопряженных образцов из одинакового материала при неизменных условиях испытаний зависят от величин их поверхностей трения. У образца с большей поверхностью трения весовой износ больше, чем у образца с меньшей поверхностью. При определенных условиях испытаний на машине трения 77МТ-1 соотношение весовых износов образцов, вырезанных из цилиндра поршневого кольца, совпадает по величине с соотношением весовых износов цилиндров и поршневых колец при испытании на двигателе. При этом результаты по оценке износостойкости, полученные для различных материалов на машине трения, полностью подтвердили результаты при испытании на двигателе. Таким образом, было установлено, что соотношение весовых износов является одним из критериев моделирования при проведении испытаний материалов на лабораторных установках. Обнаружению этого явления способствовала хорошая воспроизводимость результатов при испытании материалов на износ на машине трения 77МТ-1.

2.5. Определение способности материалов или покрытий противостоять схватыванию (заеданию)

При решении практических задач, связанных с оценкой работоспособности трущихся деталей, возникает необходимость в проведении испытаний материалов и деталей на схватывание.

Для многих случаев наиболее подходящим прибором для определения способности материалов и покрытий противостоять схватыванию при трении может служить прибор, схема которого показана на рис.3.6. Прибор предложен И.В. Крагельским и Б.И. Костецким, конструктивно оформлен Д.Н. Рукиным.

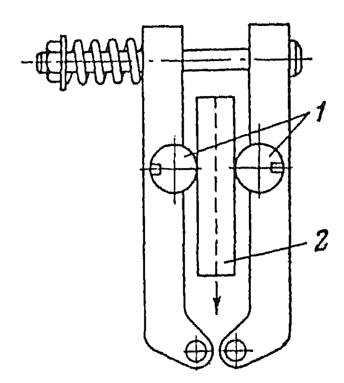


Рис. 3.6. **Прибор для испытаний на схватывание:**
1 — короткие образцы; *2* — длинный образец

В приборе между двумя параллельными короткими цилиндрическими образцами *1* сжимается расположенный перпендикулярно им третий длинный образец *2*. При протягивании длинного образца на машине для растяжения металлов снимается график "путь – сила трения". Величина силы трения и характер ее изменения служат оценкой склонности испытуемой пары к схватыванию.

Меняя место контактирования, можно испытывать одни и те же образцы несколько раз. При этом разброс в определении максимальной силы трения составляет не более 10%.

С целью устранения влияния окислов, масляных пленок и различных загрязнений на результаты испытаний чистых металлов образцы предварительно подвергают зачистке мелкой наждачной шкуркой и промывают в бензине.

Перед установкой образцов в прибор их контактные поверхности зачищают острым шабером или лезвием безопасной бритвы. Время от момента зачистки поверхностей до начала испытания должно сводиться к минимуму.

Описанный метод исследования металлов на заедание дает возможность точно определять площадь контакта и удельные нагрузки при заедании, оценить влияние на заедание тонких окисных покрытий и электролитически нанесенных слоев металлов, а также влияние на схватывание и заедание различных факторов: смазок, температуры и других. При этом методе не воспроизводятся условия работы деталей машин, поэтому следует считать, что полученные результаты могут служить лишь для сравнительной оценки поведения металлов при данных условиях.

2.6. Определение величины износа

В многочисленных научных и практических работах по вопросам износа описаны различные методы его измерения, например взвешивание продуктов износа, взвешивание самого образца, измерение впадины,

возникшей в результате износа, спектрально-аналитическое исследование продуктов износа, измерение радиоактивности [9].

Метод определения износа выбирают исходя из экспериментальных требований. Все чаще переходят к измерению износа непосредственно на промышленных установках. Так, например, методом вырезанных лунок можно определить величины износа цилиндров и поршневых колец, шеек коленчатых валов [23]. В ряде случаев используется метод изотопов. Исследуемые поверхности активируются и подвергаются износу. По радиоактивности продуктов износа можно сделать количественные заключения об износе, которые могут быть показаны с помощью регистрирующих устройств. Таким образом, весь процесс измерения можно автоматизировать. Чуствительность этого метода очень высока, так как подбором соответствующих изотопов всегда можно достичь требуемого эффекта.

Среди обычных методов испытаний первое место занимает спектральный анализ металлических продуктов износа в смазочном масле, так как в этом случае чуствительность может достигать значений $1{:}10^5$, а для некоторых элементов даже $1{:}10^6$. Этого достаточно, чтобы, например, при работе двигателя внутреннего сгорания уже через несколько часов работы обнаружить следы металла в масле. Таким образом, можно также одновременно определять износ различных деталей [9].

При выборе метода измерения износа большую роль играет вопрос о необходимости прерывания работы машины или механизма во время испытания, чтобы измерить износ различных частей. Поэтому непрерывно действующие методы, такие как радиоактивные и спектроскопические, имеют большие преимущества.

3. Методы оценки прочностных свойств

3.1. Определение способности материала или покрытия сопротивляться циклическим контактным нагрузкам

В ряде случаев работоспособность деталей, испытывающих трение скольжения и трение качения, определяется способностью материала сопротивляться поверхностной усталости. Так, например, никель-фосфорное и хромовое покрытие обладают приблизительно равными антифрикционными свойствами; ряд деталей, работающих на износ, ранее покрывался хромом, в настоящее время покрывается никелем. Однако не всегда никель-фосфорное покрытие может заменить хромовое. Исследования показывают, что никель-фосфорное покрытие обладает весьма малой способностью сопротивляться циклическим контактным нагрузкам.

Поэтому для шестерен, обойм подшипников качения, деталей червячных передач, кулачковых механизмов, испытывающих большие контактные нагрузки, нецелесообразно применять никель-фосфорные покрытия, так как они при работе выкрашиваются и отслаиваются.

Испытания на контактную усталость проводятся на двух или трех роликовых машинах. Схема двухроликовой машины показана на рис. 3.7.

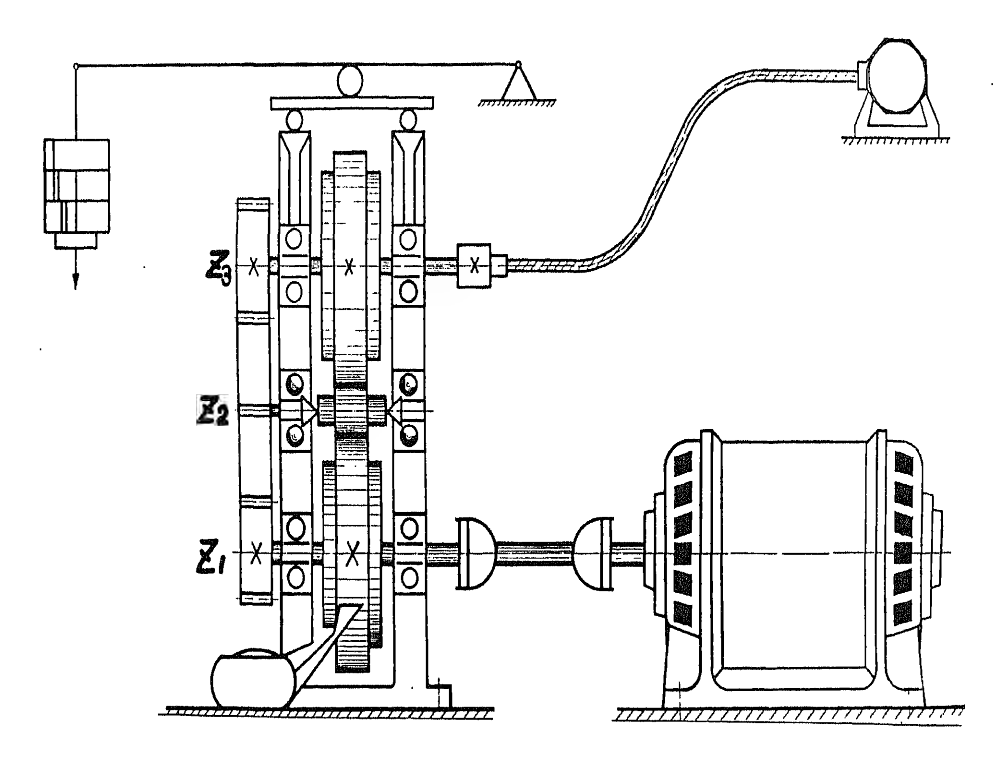


Рис. 3.7. **Испытание образца на контактную прочность на 2-роликовой машине**

Испытуемый образец закрепляется во вращающихся центрах. Нижний ролик присоединен шарнирными муфтами к валу электродвигателя. Шестерня Z-1, насаженная на вал нижнего ролика, через промежуточное колесо Z-2 приводит во вращение шестерню Z-3 и верхний ролик. Давление от нагрузочного рычага с отношением плеч 1:5 передается на свободно скользящие в параллелях станины корпуса подшипников верхнего ролика. Испытуемый образец, зажатый между роликами, увлекается ими во вращение. Изменяя отношение диаметров шестерни Z-1: Z-3, можно изменять величину относительного скольжения между образцами и роликами.

Число оборотов верхнего ролика определяется по счетчику оборотов. Нижний ролик смазывается при помощи широкого фетрового фитиля. На оба ролика машины надеты одинаковые наружные кольца подшипников качения.

За каждый оборот образца его поверхность подвергается двум полным циклам нагружения. Более полное описание машины дано в работе [22].

Основной целью при испытании на циклическую контактную прочность является установление зависимости между нормальными контактными напряжениями и количеством циклов нагружения до появления первой трещины или же до заранее установленного размера поврежде-

ния на рабочей поверхности образцов. Как правило, испытания проводятся при наличии смазки.

3.2. Определение способности материала сопротивляться динамическим нагрузкам

Иногда требуется установить, как ведет себя тот или иной материал или покрытие при динамическом контактном приложении нагрузки. В частности, при использовании электролитического хромового покрытия в узлах трения, испытывающих ударные нагрузки, в наиболее нагруженных местах наблюдалось выкрашивание и отслаивание хромового слоя от основного материала. В связи с этим было необходимо провести исследование влияния на динамическую контактную прочность хромового покрытия, прочности материала основания, толщины покрытия, характера пористости и других факторов. Автором была изготовлена установка, которая позволяла нагружать испытуемую поверхность ударом как на сжатие, так и на сжатие со сдвигом [3].

Схема установки представлена на рис.3.8.

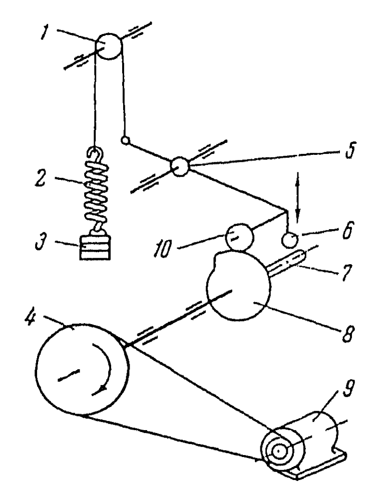


Рис. 3.8. **Приспособление для испытания поверхности на удар со сдвигом и без сдвига:**
1 — блок; *2* — пружина; *3* — груз; *4* — шкив; *5* — ось; *6* — шарик; *7* — испытуемая цапфа; *8* — кулачковая шайба; *9* — электромотор; *10* — ролик

Вращение от двигателя *9* передается клиноременной передачей на шкив *4*, сидящий на полом валу. Полость вала заканчивается конусом, в который вставляется испытуемая цапфа *7*. На ней крепится однокулачковая шайба *8*, по беговой дорожке которой катится ролик *10*. Ролик вращается на оси ударника, укрепленного при помощи шпонки и трех винтов в рычаге, качающемся вокруг оси *5*. Другой конец рычага под действием груза *3* прижимает ролик через блок *1* к беговой дорожке шайбы.

При вращении вала ролик сначала поднимает ударник (рычаг), затем соскакивает с кулачка шайбы, шарик *6* ударяет по цапфе. Затем ролик вновь

набегает на беговую дорожку шайбы и поднимает рычаг с ударником. Таким образом, за каждый поворот вала шарик один раз ударяет по цапфе. Для сохранения постоянства положения груза в момент удара груз подвешивается на пружине *2*. Чтобы на одной и той же цапфе можно было провести несколько испытаний, предусмотрена возможность перемещения рычага вместе с блоком и грузом вдоль оси *5* и закрепления в нужном положении. Кроме того, поворотом шайбы можно смещать место удара шарика о цапфу. Изменяя число оборотов и нагрузку на рычаг, можно изменять соотношение скоростей и соотношение величин нормальных и касательных напряжений в поверхностном слое цапфы.

Образцы представляют собой цапфы с конусными хвостовиками. Испытания гальванических хромовых покрытий на установке показали, что прочность их зависит от прочности материала основания, режима термической обработки, как и режима осаждения покрытий. Испытаниями можно установить наиболее целесообразные виды покрытий и области их применения [3].

4. Метод испытания материала на повторную пластическую деформацию

Особенностями процесса изнашивания, как известно, являются:

1) повторность деформаций, происходящая в контактирующих точках (в противном случае это будет не изнашивание, а резание или шлифование), что приводит к изменению свойств материала [11];

2) взаимное внедрение, вызванное неоднородностью поверхности трения по твердости и приводящее к пластическому оттеснению материала.

Некоторые высоконагруженные детали при эксплуатации испытывают очень высокие повторные пластические деформации. К таким деталям относятся в первую очередь пара трения колесо—рельс, а также высоконагруженные детали, работающие в абразивной среде. Так, например, после прохода поезда на участке поворота железной дороги вблизи рельсов обнаруживаются очень мелкие металлические частицы в виде иголок, которые после некоторого времени окисляются и превращаются в черный порошок. Эти частицы представляют собой продукты износа колеса и рельса. В данном случае контактируемые поверхности находятся на грани резания и повторной пластической деформации, т. е процесса резания и изнашивания.

Учитывая указанные особенности процесса изнашивания некоторых деталей, был разработан новый метод испытания поверхностного слоя материалов на повторную пластическую деформацию. О необходимости разработки такого метода говорилось И.В. Крагельским на 1-й Киевской научно-технической конференции по вопросам повышения износостойкости и срока службы машин в 1952 г. В дальнейшем он был обоснован В.М. Гутченко [5]. Автором данной книги была предложена методика испытаний, форма образцов и выявлены некоторые закономерности таких испытаний [4].

Методика испытания и конструкция образцов

Испытания на повторную пластическую деформацию проводились на машине трения МИ. Для испытаний изготавливались специальные образцы и профилированный ролик. Профилированный ролик изготавливается из инструментальной стали и закаливается до твердости Rc=64. Испытуемый образец насаживается на нижний шпиндель машины, а профилированный ролик — на верхний шпиндель (рис. 3.9).

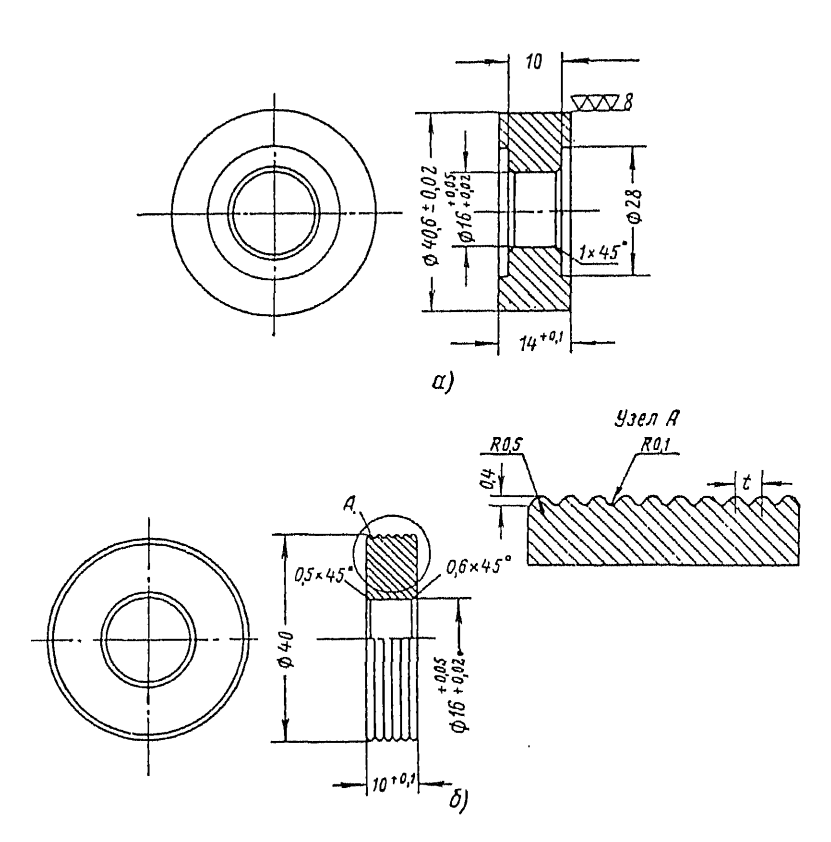


Рис. 3.9. **Испытание на повторную пластическую деформацию:**
а — образец; *б* — профилированный ролик

Образец и профилированный ролик работают на качение с поперечным смещением в 3 мм. При нагружении машины профилированный ролик внедряется в испытуемый образец, а при взаимном качении на рабочей поверхности образца продавливаются бороздки. Благодаря поперечному смещению профилированного ролика по отношению к испытуемому образцу при каждом повороте ролика бороздки появляются на новом месте.

Конструкция машины МИ позволяет производить испытания на повторную пластическую деформацию при различных нагрузках, со смазкой и без смазки, а также определять работу, затраченную на деформацию.

Перед испытанием какого-либо материала необходимо построить зависимость между величиной нагрузки на профилированный ролик и величиной деформации испытываемого образца. Такие зависимости можно получить непосредственно на машине трения при помощи индикатора с ценой деления в 1 мкм. При этом необходимо учитывать упругие прогибы шпинделя образца и шпинделя профилированного ролика.

Проведенные испытания на повторную пластическую деформацию бронзы БрАЖМц показали, что для получения стабильных результатов необходимо соблюдать следующие условия:

1) постоянный профиль ролика. В результате работы ролик изнашивается и его способность к деформации снижается. Изношенность ролика и его пригодность к работе должна проверяться по величине заранее установленного его износа;

2) постоянная величина поперечного движения профилированного ролика. При увеличении или уменьшении величины поперечного движения ролика резко изменяется интенсивность изнашивания образца. При проведении испытаний необходимо выдержать заданное поперечное смещение профилированного ролика в пределах 0,1 мм;

3) постоянный тепловой режим испытания. В случае изменения заданной температуры интенсивность изнашивания образца изменяется.

Характеристики материала, определяемые методом испытания на повторную пластическую деформацию

При испытании на повторную пластическую деформацию можно определить следующие характеристики пары трения:

— способность материала сопротивляться повторной пластической деформации в условиях сухого трения и смазывания различными смазочными материалами, действия абразива, влаги, повышенной температуры и др.;

— оценки влияния водорода, образующегося в процессе работы деталей;

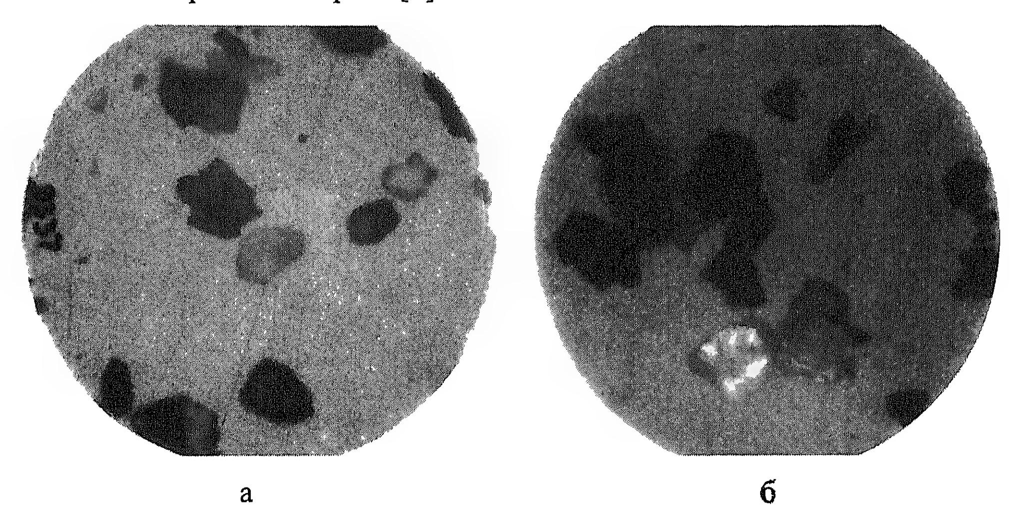
— влияния твердости и химического состава контактируемых деталей на их износостойкость.

Ниже приведены некоторые результаты испытаний материалов, применяемых в трущихся узлах самолетных конструкций.

Продукты износа

Продукты износа, получающиеся в результате пластической деформации металлов, похожи на продукты износа узлов трения реальных механизмов. При больших деформациях (примерно 10...15 мкм) продукты износа представляют собой мелкие частицы с характерным металлическим блеском. При малых величинах деформации (примерно 2...3 мкм) продукты износа изменяются — они представляют мельчайшие частицы темного цвета без металлического блеска. На рис. 3.10, *а* показаны продукты

износа стали 45, полученные при повторной пластической деформации. На рис. 3.10, *б* показаны продукты износа деталей шасси самолета, работающие в абразивной среде [4]. Видно, что они схожи.



а б

Рис. 3.10. **Продукты износа:**
а — стали 45 при испытании на повторную пластическую деформацию; *б* — деталей шасси самолета, ×100

Влияние смазки

На пластическую деформацию существенное влияние оказывает смазка. При испытании со смазкой рабочая поверхность образцов становится блестящей, при испытании без смазки при больших деформациях матовой, а при малых деформациях поверхность покрывается окислами металла и приобретает темный цвет.

Смазка значительно влияет на величину износа образцов. Характерно, что это влияние зависит от величины деформации. При малых деформациях смазка во много раз уменьшает износ образцов, а при больших деформациях, наоборот, увеличивает износ образцов. Различное влияние смазки на износ образцов в зависимости от степени деформации можно объяснить, основываясь на работах академика П.А. Ребиндера и его сотрудников. В них указывается, что, с одной стороны, смазка облегчает процессы пластической деформации и способствует развитию микротрещин, увеличивает износ металла (это происходит, например, при приработке деталей); с другой стороны, смазка уменьшает явление заедания и окисление металлов и тем самым уменьшает износ. На рис. 3.11 показана зависимость величины износа образца из бронзы БрАЖМц от величины деформации. Испытания проводились со смазкой и без смазки.

Кривые *1* и *2* на рис. 3.11 пересекаются. Точку пересечения *P* следует назвать "критической". Область от "критической" точки влево характеризует способность к схватыванию. Чем больше от этой области расстоя-

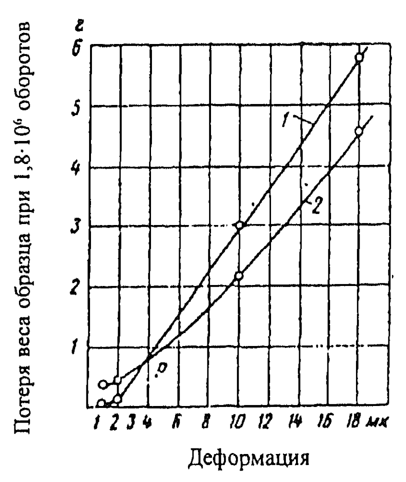


Рис. 3.11. **Потеря веса бронзового образца от величины деформации:**
1 — со смазкой; *2* — без смазки

ние кривой *2* от кривой *1*, тем больше способность материала к схватыванию, тем лучше смазочная способность масляной пленки.

Область от точки Р вправо характеризует пластифицирующее действие смазки на бронзу БрАЖМц. В этой области износ при смазке больше износа без смазки. Смазка в данном случае способствует пластической деформации и увеличивает износ. При большой пластической деформации усиливаются процессы резания. При этом смазка усиливает процесс резания.

Выполненная работа подтверждает тот факт, что не всегда целесообразно смазывать детали обычными смазочными материалами. При больших пластических деформациях поверхностного слоя целесообразно перейти с обычных смазок на металлоплакирующие смазочные материалы. Так, например, в практике эксплуатации железнодорожного транспорта были случаи, когда износ рельсов на крутых поворотах железного полотна при их смазывании обычными смазками значительно увеличивался. При таких обстоятельствах необходимо переходить на смазывание рельсов смазками, реализующими избирательный перенос при трении.

Характер разрушения поверхности

Для определения характера разрушения металлов при повторной пластической деформации испытанные образцы были подвергнуты металлографическому исследованию, показавшему, что разрушение поверхностного слоя носит избирательный характер. Поверхностный слой вследствие неоднородности структуры подвергается пластической деформации неравномерно. Одни участки претерпевают пластическую деформацию интенсивно, другие почти ее не испытывают. В результате однородность поверхности еще более увеличивается. На поверхности возникают места предразрушения, которые в конечном счете выкрашиваются (рис. 3.12).

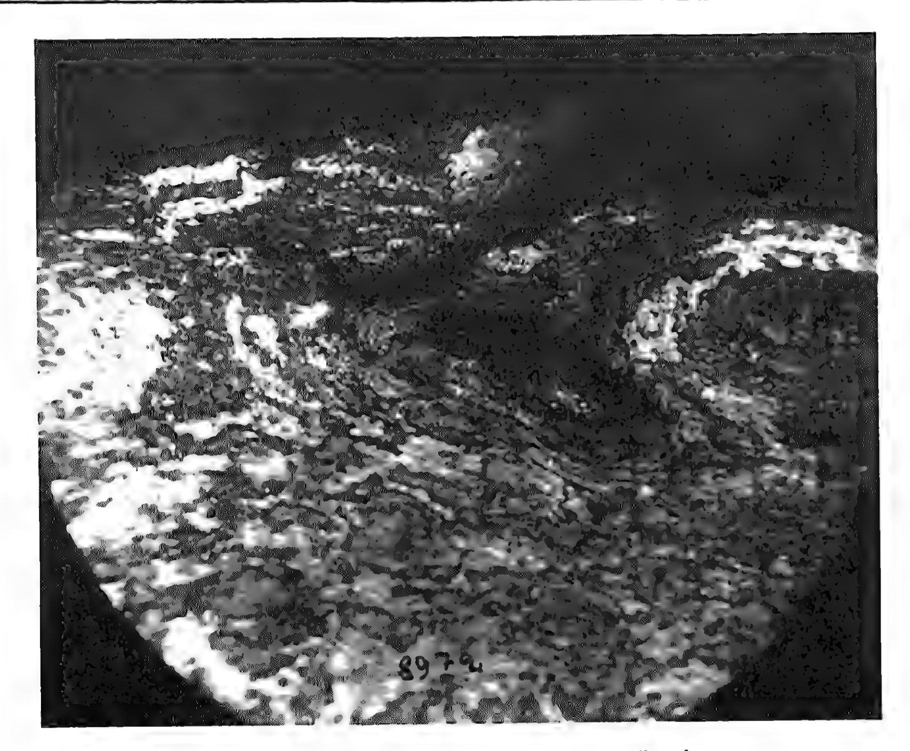


Рис. 3.12. **Место предразрушения при повторной пластической деформации**

Испытания при заданной нагрузке и заданной деформации

Испытания на повторную пластическую деформацию можно проводить по заданной деформации и нагрузке. Нагрузка при испытании по заданной деформации выбирается в зависимости от твердости образцов с таким расчетом, чтобы деформация для всех образцов была одинакова. Нагрузка при испытании по заданной нагрузке выбирается для всех образцов одинаковой.

Такое различие в испытаниях обусловлено тем, что одни узлы трения работают по заданной деформации, а другие — по заданной нагрузке. Так, например, при попадании абразивных зерен в зазор между бронзовым вкладышем и стальной цапфой на трущихся поверхностях возникают царапины, величина которых зависит от величины абразивных зерен. В данном случае износ сопряжения будет происходить в результате многократного пластического деформирования, величина которого задана величиной абразивных зерен. Естественно, здесь необходимо учитывать и эффект внедрения абразивных зерен в бронзовый вкладыш и последующий износ стального вала.

Другой пример: чугунное поршневое кольцо цилиндра двигателя внутреннего сгорания работает по заданной нагрузке, которая определяется упругостью кольца.

Проведенные нами испытания показали, что сопротивление к повторной пластической деформации при заданной нагрузке зависит от твердости материала, а также от его химического состава. При увеличении твердости сопротивление увеличивается. Сталь 30ХГСА с твердостью Rc = 33 при смазке имеет несколько бóльшую стойкость к повторной деформации, чем сталь 45 при той же твердости.

При заданной деформации способность сопротивлению повторной деформации для стали 45 в пределах Rc = 34–52 остается практически постоянной.

Сталь 45 в незакаленном состоянии показала малую способность к сопротивлению повторной пластической деформации как при заданной нагрузке, так и при заданной деформации. Это подчеркивает нецелесообразность использования в узлах трения стали 45 в незакаленном состоянии [4].

Дальнейшее изучение способности материалов противостоять повторной пластической деформации в зависимости от структуры, твердости, химического состава материала, смазочного материала и других факторов позволит более глубоко оценить поверхностную прочность конструкционных материалов, применяемых в тяжелонагруженных узлах трения.

5. Методы лабораторных испытаний смазочных материалов, реализующих избирательный перенос

5.1. Общие замечания

В литературе описано большое количество машин трения и приборов для испытания в лабораторных условиях смазочных материалов [20, 21]. Испытуемые образцы в некоторых из описанных машин и приборов имеют точечный или линейный контакт. Например, в четырехшариковой машине трения масло испытывается в пирамиде из четырех шаров, из которых три нижних закреплены неподвижно в чашке, куда заливается испытуемое масло, а верхний шар вращается в вертикальном шпинделе. Здесь имеются три точечных контакта. Работает стальной закаленный шарик по такому же шарику. Четырехшариковая машина нашла широкое применение в маслоиспытательных лабораториях стран СНГ.

В машине Тимкина, распространенной в США и Великобритании, в качестве испытуемых образцов применяется ролик – наружное кольцо конического роликоподшипника и плоскость — прямоугольный брусок. Опыты ведутся при последовательно увеличиваемых нагрузках по методике И = f (P), где И – ширина следа износа, имеющего в данном случае вид прямоугольника. Продолжительность одного опыта 10 мин. Оценка масел производится по нагрузке задирания. В машине Тимкина начальный контакт деталей является линейным .

На описанных машинах трения нельзя проводить испытания смазочных материалов, реализующих избирательный перенос при трении, поскольку испытуемые в них образцы имеют точечный или линейный контакт. Это связано со следующими обстоятельствами.

Как было описано ранее, смазочные материалы, реализующие избирательный перенос при трении, способны создавать на трущихся поверх-

ностях диссипативные структуры с особыми свойствами. Металлоплакирующие смазки, содержащие медь или олово, или их соединения, существенно снижают износ поверхностей при трении, а если в них реализуется диссипативная структура, то износ снижается более чем на порядок.

Диссипативные структуры могут реализоваться в парах трения бронза—сталь при смазках, не содержащих соединения меди, а образующих пленку за счет избирательного растворения бронзы.

Реализация диссипативной структуры в поверхностном слое имеет место при протекании особого рода диффузионных процессов, обусловленных избирательным растворением, лигандами смазки, а также высокой активации деформированной поверхности при трении [18]. В результате интенсивного образования вакансий при растворении дислокации изменяют направление и скорость движения. Двигаясь к поверхности, они выходят на нее, создавая участки, где атомы имеют свободные связи. На этих участках идет химическая реакция между лигандами смазочного материала и активными атомами и возникает комплексное соединение [13]. Не все сплавы способны образовывать диссипативные структуры, и для того чтобы выделить сплавы, способные их образовывать, применяют рентгеноструктурный метод скользящего пучка [18].

Комплексное соединение является основой смазочной композиции и осуществляет смазочное действие как адсорбируемое поверхностно-активное вещество. Частично распадаясь в зоне трения, оно снова дает лиганды и ион металла. В этом состоит ограниченный цикл превращений в смазке, отличающийся от процессов трибодеструкции и окисления, идущих в смазке при граничном трении и ничем не ограниченных. Описанный процесс не может происходить в точечном или линейном контакте. Необходим контакт по плоскости, на которой происходит обмен веществом между смазочной средой и поверхностями трения [15].

Исходя из вышеизложенного, следует, что машины трения с точечным или линейным контактом образцов (четырехшариковая машина, машина Тимкена и др.) не подходят для испытаний смазочных материалов, реализующих избирательный перенос при трении. Испытания таких смазочных материалов должны проводиться на машинах трения, у которых образцы при трении скольжении контактируют по площадкам, имеющим длину и ширину.

Исследования пар трения, образующих диссипативную структуру, заключаются в построении зависимостей относительная износостойкость – нагрузка или скорость, позволяющих выявить границы диссипативной структуры на машинах трения с типом контакта плоскость – плоскость [15]. Такие зависимости можно получить на машинах трения АЕ-5 и 77МТ-1, образцы которых имеют плоский контакт. Ниже приведены некоторые результаты исследований диссипативных структур, выполненных на указанных машинах А.А. Поляковым [15].

На рис.3.13 приведены результаты испытания пары трения с металлоплакированием и образца с диссипативной структурой на машине трения АЕ-5. Из рисунка видно, что при трении пары, создающей диссипа-

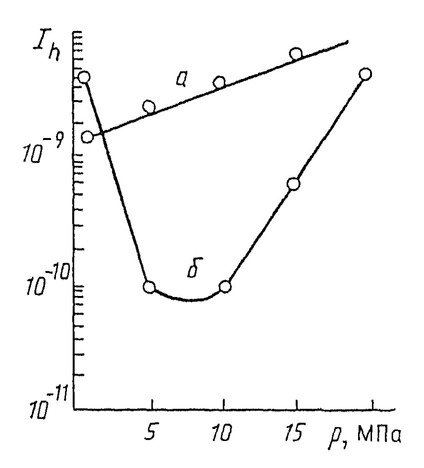


Рис. 3.13. **Износостойкость пленки на поверхности трения только с металлоплакированием (*а*) и с диссипативной структурой (*б*)**

тивную структуру, образуется область повышенной износостойкости в определенном диапазоне давлений.

В случае *а* взята пара трения БрАЖНМц 10-4-4-2 со сталью в керосине с активной добавкой, в случае *б* — пара трения БрА5 со сталью в веретенном масле АУ.

Критерием годности смазочного материала в сочетании со сплавом, образующим диссипативную структуру, является степень относительной износостойкости при данной нагрузке и ширина диапазона нужного уровня износостойкости. Так, например, если необходимо обеспечить уровень износостойкости 10^{-10}, то должны работать в диапазоне нагрузок 5... 10 МПа.

Наличие диссипативной структуры подтверждается проявлением флуктуаций коэффициента трения. На рис. 3.14 видно, что в случае диссипативной структуры флуктуация от внезапного приложения нагрузки затухает от меньших значений коэффициента трения к большим, а в случае граничного трения наоборот.

На рис. 3.15 приведены кривые изменения коэффициента трения для граничной смазки (верхние кривые) и диссипативной структуры избира-

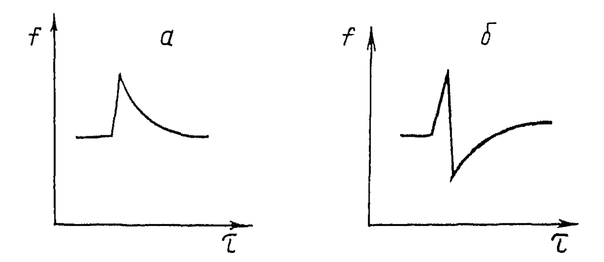


Рис. 3.14. **Характер затухания флуктуаций при граничном трении (*а*); при трении с диссипативной структурой в пленке (*б*)**

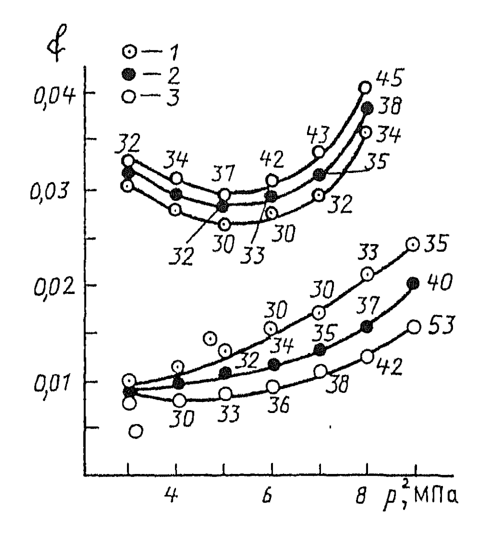


Рис. 3.15. **Зависимость коэффициента трения от давления при смазывании маслом МС-20 (верхние кривые) и глицерином (нижние кривые) при различных скоростях скольжения v; м/с; 1–0,6; 2–1; 3–2. Цифры на кривых — температура в °С**

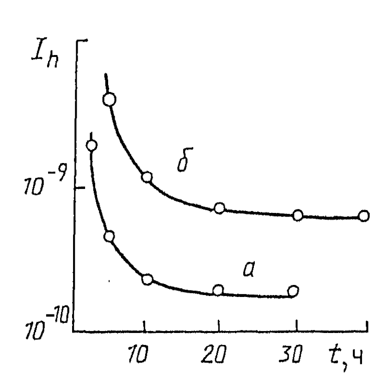


Рис. 3.16. **Интенсивность изнашивания бронзы БрА5 в жидкости П10-2 при реверсивном (*а*) и поступательном (*б*) движении**

тельного переноса (нижние кривые) при повышении скорости скольжения. Видно, что при увеличении температуры (например, вследствие повышения скорости) коэффициент трения при избирательном переносе может понижаться (в определенных пределах).

При трении с возвратно-поступательным движением имеет место значительно большая активация поверхностного слоя, чем при поступательном движении [6]. Поэтому результаты испытаний на износостойкость по сравнению с результатами при поступательном движении могут существенно отличаться в ту или другую сторону (рис. 3.16).

При трении в среде активных жидкостей активация поверхности при реверсивном движении может привести к появлению коррозионной составляющей износа. Это вызывает необходимость в проведении испытания смазочного материала при реверсивном движении. С другой стороны, недостаточная активность смазки при поступательном движении (малая активизация поверхности трения может привести к отсутствию условий для образования диссипативной структуры [15].

5.2. Новая установка для определения триботехнических характеристик материалов и смазочных сред в режиме избирательного переноса

Многолетний опыт определения триботехнических характеристик материалов, покрытий, смазочных материалов, присадок к ним на машинах трения СМЦ-2, МИ-1М, НИДИ, типа Амслера и многих других свидетельствует о невозможности фиксирования ряда параметров, характе-

ризующих физико-химические процессы в зоне контакта образцов. К таким параметрам можно отнести образование и разрушение сервовитной пленки, определение предельных очень высоких удельных нагрузок и др. В этих машинах трения используют образцы с большой рабочей поверхностью (1...4 см^2), в результате процесс приработки занимает много времени. Кроме того, такие образцы имеют большое тепловыделение, что усложняет, а иногда практически исключает возможность проведения испытаний при высоких нагрузках и скоростях скольжения.

Оснащение таких установок высокоточными датчиками износа и момента (силы) трения оказывается неэффективным из-за большого температурного расширения испытуемых образцов и рабочей камеры. Во многих случаях результаты лабораторных испытаний не совпадают с результатами, полученными на реальных машинах. Часто при испытаниях на износ не соблюдаются условия равенства отношений площадей трения образцов и площадей трения реальных деталей.

С другой стороны, как было показано ранее, нельзя испытывать конструкционные и смазочные материалы на машинах трения с точечным или линейным контактом.

Учитывая все изложенное, А.К. Прокопенко с сотрудниками разработал и изготовил малую серию установки ПТХ-3 (рис. 3.17) по определению триботехнических характеристик конструкционных смазочных материалов [17].

Испытуемые образцы *1* и *2* помещены в герметичную камеру *9*. Вращающийся образец-ролик *2* закреплен гайкой *3* на валу синхронного электродвигателя, ротор *8* и статор *7* которого также размещены в камере. Самоустанавливающийся образец *1* поджимается к вращающемуся ролику рычагом *13*. Усилие, действующее на рычаг, создается пружиной *17*, натяжение которой регулируется перемещающейся по винту *16* гайкой *18*. Винт приводится во вращение ротором *14* реверсивного электродвигате-

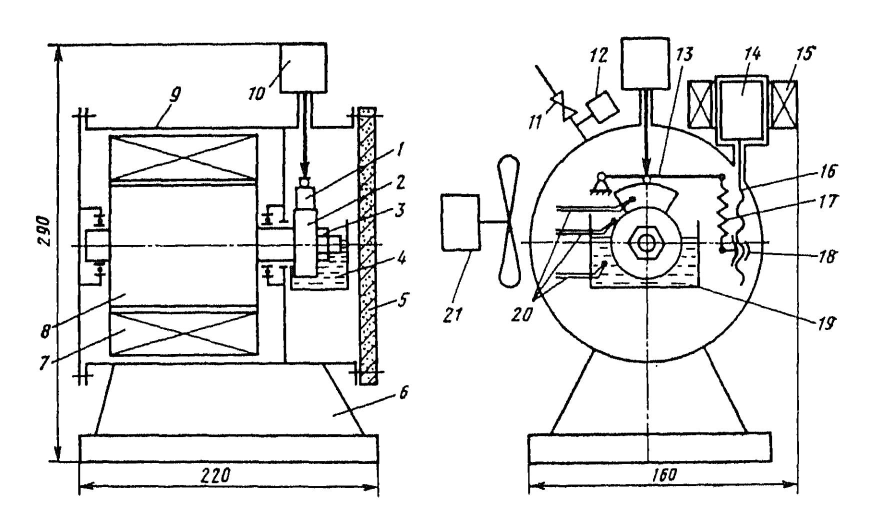


Рис. 3.17. **Малогабаритная установка для испытаний по схеме колодка – ролик**

ля, статор *15* которого вынесен за пределы камеры. Герметичная камера установлена на подставке *6*. Для охлаждения обмоток электродвигателей имеется вентилятор *21*. Смазывание испытуемых образцов производится погружением в масло *4*, для чего предусмотрена ванночка *19*. Для заполнения камеры газом имеется вентиль *11*. Давление контролируется с помощью манометра *12*.

Устройство *10* служит для непрерывной регистрации суммарного линейного износа образцов. Кроме износа непрерывно регистрируется момент трения (по потребляемому электродвигателем току) и температура колодки, ролика и масла с помощью термопар *20*. Для визуального наблюдения за процессом трения во время испытаний крышка *5* выполнена из стекла.

Малые габариты, простота конструкции, возможность непрерывной регистрации и записи основных параметров процесса трения позволяют проводить испытания на данной установке с высокой точностью.

Далее более подробно рассмотрено устройство для непрерывной регистрации суммарного линейного износа образцов при трении. Устройство (рис. 3.18, *а*) изготовлено на базе электрического датчика давления ДТМ-15. В корпусе *5*, соединенном с герметичной камерой *6*, размещен потенциометр *2* с ползуном *3*, перемещение которого осуществляется штифтом *4*. Опускание штифта происходит в результате уменьшения суммарного размера испытуемых образцов *8* и *9*, находящихся под нагрузкой.

Нагружение образцов производят через рычаг *7*. Корпус устройства закрывается герметичной крышкой *1*. Питание потенциометра осуществляется от элемента "Марс" (или другого источника тока) через добавочное сопротивление R_1. Включение источника питания производят выключателем $B_к$. Переменное сопротивление R_2 образует с потенциометром мос-

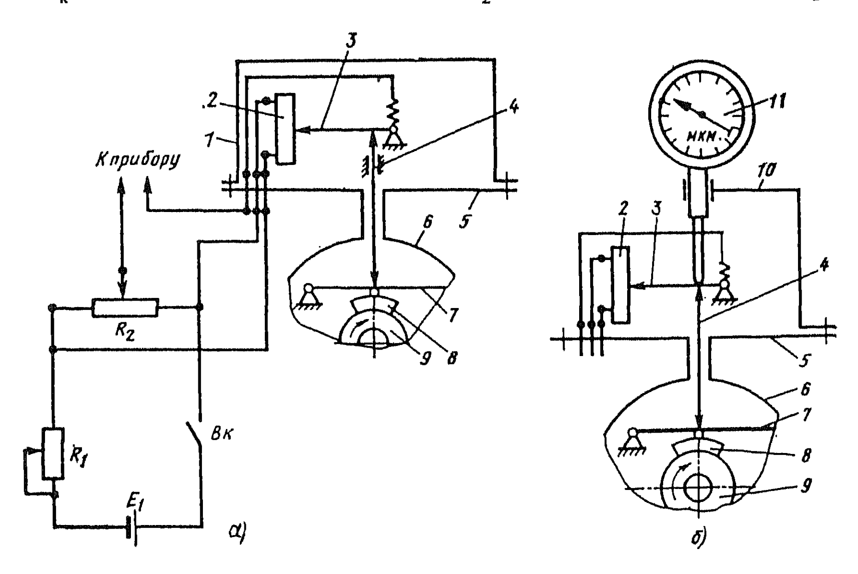


Рис. 2.18. **Схема подключения (*а*) и градуирования (*б*) устройства для непрерывной регистрации износа образцов**

товую схему и служит для установки нуля на приборе. Регистрацию суммарного линейного износа можно производить с помощью любого высокочувствительного прибора с большим входным сопротивлением.

Устройство работает следующим образом. В результате износа образцов происходит опускание штифта *4* и, следовательно, перемещение ползуна потенциометра. Это приводит к разбалансировке мостовой схемы, и на прибор будет подан электрический сигнал, величина которого прямо пропорциональна изменению размеров образцов (суммарному линейному износу).

Высокое сопротивление потенциометра (около 4 кОм) обеспечивает длительную непрерывную работу устройства от элемента. Максимальная чувствительность устройства ±0,3 мкм.

Градуировку устройства (рис. 3.18, *б*) производят во время работы установки, для чего снимают крышку *1* и с помощью кронштейна *10* на корпус устанавливают индикатор *11*. Иглу индикатора поджимают к ползуну в точке его соприкосновения со штифтом. Таким образом, перемещение штифта может быть измерено с помощью индикатора и зафиксировано регистрирующим устройством как изменение величины электрического сигнала. Зная перемещение штифта устройства, можно определить масштаб на регистрирующем приборе.

Результаты исследований закономерностей избирательного переноса при трении, выполненные на описанном приборе, изложены в работах А.К. Прокопенко и В.Г. Бабель (см. главу 2).

6. Замечания о стендовых и эксплуатационных испытаниях

Помимо лабораторных испытаний в решении триботехнических задач важное место занимают стендовые и эксплуатационные испытания. Поскольку такие вопросы выходят за рамки данной книги, сделаем лишь некоторые общие замечания.

В последние годы в мировой практике имеется тенденция к расширению стендовых испытаний на износ. За рубежом это в некоторой степени связано с частой модификацией машин (особенно легковых автомобилей) в результате роста конкуренции. Но главное заключается в том, что стендовые испытания научно-исследовательского характера позволяют в короткие сроки изучить технические характеристики машины, проверить правильность конструкторских решений, выбор расчетных схем, размеров и параметров деталей узлов трения, установить гарантированный срок службы, выявить неблагополучные с точки зрения прочности, износостойкости, жесткости и других признаков узлы и детали для разработки соответствующих конструктивных и технологических мероприятий. Стендовые испытания могут проверены на элементах узла, на узле, взятом отдельно от агрегата и на агрегате в сборе. Например, при испытаниях ведущих мостов автомобилей испытывают отдельно картеры, полуоси, шестерни, подшипники и мосты в сборе.

В связи с разнообразием условий эксплуатации многих машин на работу их влияют переменные факторы в различных сочетаниях. Стендовые испытания позволяют изучить влияние отдельных факторов на работу узлов и агрегатов; создать стабильный режим нагружения, близко воспроизводящий те или иные эксплуатационные условия; применять увеличенные или учащенные нагрузки по сравнению с эксплуатационными для ускорения испытаний; реализовать специальные режимы нагружения для сравнительной оценки различных конструкций и технологий изготовления. При сроке службы машины, исчисляемом многими тысячами рабочих часов, стендовые испытания являются во многих случаях единственной возможностью современной экспериментальной проверки конструкции.

В дальнейшем еще более будут ужесточены сроки создания и постановки на производство новых машин и оборудования. В этом случае стендовые испытания будут играть одну из основных ролей. Ряд примеров показывает, что недостаточное внимание к проведению стендовых испытаний значительно затягивало сроки доводки машин, приводило к постановке в серийное производство недостаточно износостойких и надежных узлов трения, а иногда заканчивалось тяжелыми последствиями и большим материальным ущербом.

В ближайшее время можно ожидать значительное развитие стендового хозяйства в заводских лабораториях, в научно-исследовательских институтах промышленных министерств и ремонтного производства.

Стендовые испытания не могут заменить эксплуатационных испытаний. Последние позволяют получить наиболее ценные сведения о работе машины в условиях ее службы и являются основой для совершенствования конструкции машины, установления предельных эксплуатационных зазоров подвижных посадок, уточнения характера профилактических мероприятий технического обслуживания машины и установления потребности в запасных частях.

Глава 4. НОВЫЙ КУРС В ПРЕПОДАВАНИИ ТРИБОТЕХНИКИ

Со второго семестра 1999 г. в Российском государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина при подготовке студентов по специальности 120600 "Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов" введен специальный курс "Избирательный перенос в узлах трения". Отдельные разделы такого курса читаются и в других университетах России (Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, Пензенский государственный технический университет, Московский государственный университет сервиса).

Помимо теоретических и экспериментальных исследовательских работ по эффекту безызносности, изложенных в первой, второй и третьей главах второй части книги, в данном курсе более подробно излагаются следующие три метода повышения ресурса машин, основанные на эффекте безызносности:

— финишная антифрикционная безабразивная обработка трущихся поверхностей деталей;

— металлоплакирующие смазочные материалы;

— безразборное восстановление изношенных машин и оборудования.

Эти три метода кратко изложены в следующей последовательности:

а) сущность метода; б) где используется метод; в) эффективность метода; г) возможность применения метода в машинах и оборудовании.

1. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) стальных и чугунных деталей узлов трения

1.1. Сущность метода ФАБО

Сущность технологического процесса ФАБО состоит в том, что стальные и чугунные детали после окончательной традиционной обработки (резание, шлифование, полирование, хонингование и др.) покрывают тонким слоем (1...5 мкм) латуни, меди или бронзы. Покрытие производят путем трения латунного, медного или бронзового прутка (инструмента) о поверхность детали, смазывая при этом поверхность трения технологической жидкостью. При трении материал прутка (инструмента) переносится на стальную (или чугунную) поверхность детали.

Процесс переноса металла при трении ранее считался вредным явлением, поскольку он сопровождается интенсивным изнашиванием и повреждением трущихся поверхностей, особенно при сухом трении. При смазывании маслом этот процесс происходит в меньшей степени, лишь в

отдельных местах контакта. Здесь большую роль играют окислительные пленки, возникающие в зоне контакта и препятствующие непосредственному соприкосновению материала детали с инструментом.

Для того чтобы наносимый слой латуни был сплошным и ровным, необходимо, чтобы поверхность детали не имела окисных и масляных пленок, а материал инструмента пластифицировался поверхностно-активным веществом в процессе нанесения покрытия. Давление при трении должно обеспечивать полное прилегание поверхностей инструмента к поверхности детали. При таких условиях перенос материала инструмента на деталь происходит сплошным слоем, состоящим из очень мелких частиц, хорошо сцепленных как со стальной (или чугунной) поверхностью, так и между собой.

С этой целью детали, подлежащие ФАБО, обезжиривают, зачищают шлифовальной шкуркой, а сам процесс ФАБО производят при смазывании обрабатываемой поверхности технологической жидкостью, например глицерином. Глицерин в результате малой адсорбционной способности не препятствует непосредственному контакту, а значит, схватыванию металлических поверхностей при трении. В то же время при повышенной температуре, возникающей при трении, он восстанавливает окисные пленки как на стали, так и на инструменте, что способствует схватыванию и улучшению условий переноса материала инструмента.

Шероховатость поверхности после ФАБО деталей практически не отличается от исходной шероховатости.

ФАБО поверхностей деталей, представляющих тела вращения (болты, оси, втулки и др.) можно проводить с помощью простейшего приспособления на обычном токарно-винторезном станке. Приспособление показано на рис. 4.1.

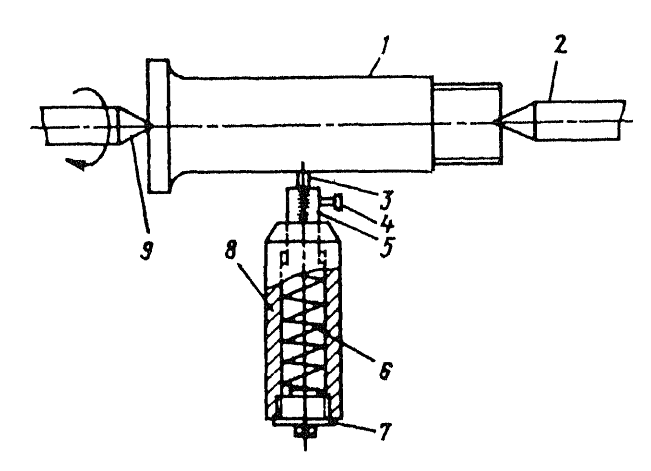


Рис. 4.1. **Приспособление для ФАБО валов, болтов и др. деталей:**
1 — подвергаемая ФАБО; *2* — центр задней бабки; *3* — инструмент; *4* — крепежный винт; *5* — плунжер; *6* — пружина; *7* — заглушка; *8* — корпус приспособления; *9* — ведущий центр

Обработку ФАБО гильз цилиндров производят на токарном станке с помощью приспособления, установленного в резцедержателе токарного станка. На рис. 4.2 показана его передняя часть. Она имеет головку *8* со стаканами *7* и *16*; в разрезных направляющих втулок *2* и *15* перемещаются два подвижных штока *6* и *12*. Через систему рычагов усилие от подпружиненной тяги *9* передается на штоки, и установленные в них прутки латуни или бронзы *4* и *14* прижимаются к обрабатываемой поверхности *3* с давлением 80...120 МПа. Рычаги *17* соединены шарнирно с крышкой *1* головки и вилкой тяги. Самоустановка прутков латуни в процессе работы обеспечивается перемещением вилки *11*, имеющей паз, относительно болта *10*. По мере износа прутки перемещаются в радиальном направлении в гайках *5* и *13* на 12 мм, что достаточно для обработки одним комплектом прутков диаметром 4 мм нескольких гильз диаметром 150 мм и длиной 264 мм.

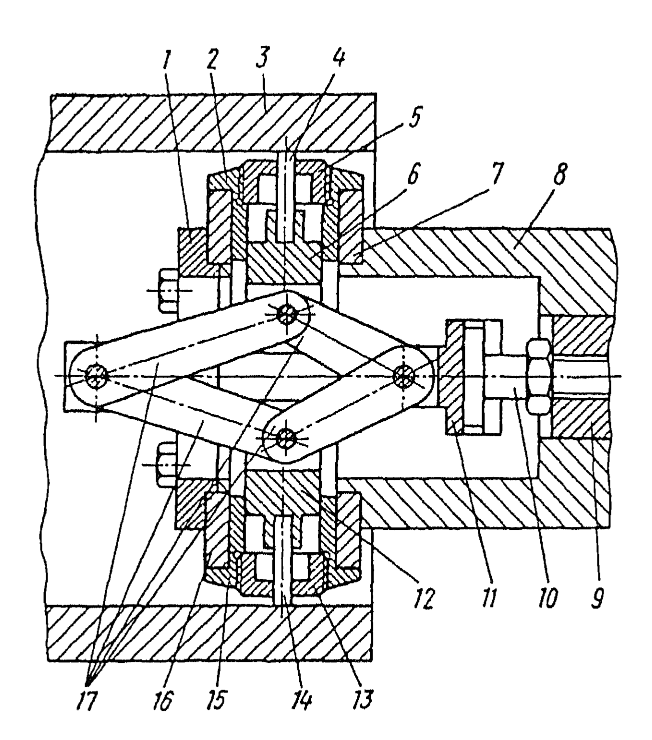


Рис. 4.2. **Приспособление для ФАБО цилиндров двигателя**

За последние годы в России (к.т.н. Эжиевым Г.И.) и в Германии (д.т.н. проф. Польцером) для производства ФАБО цилиндров разработаны полуавтоматы, которые используются на предприятиях по ремонту автотракторной техники. В России полуавтоматы для ФАБО цилиндров изготавливаются малыми сериями; стоимость одного полуавтомата приблизительно равна 40 тыс. руб. (цена 1999 г.).

1.2. Где используется технологический процесс ФАБО

Технологический процесс ФАБО использовался с целью устранения задиров в шарнирно-болтовых соединениях на самолетах типа ТУ и повышению износостойкости и устранения задиров в узлах трения машин текстильной промышленности. В автотракторной промышленности ФАБО применяют для ускорения приработки цилиндров двигателей и поршневых колец, шеек коленчатых валов и сопрягаемых с ними вкладышей. В турбореактивных двигателях ФАБО использовали для повышения срока службы подшипников качения и деталей топливной аппаратуры. В станкостроении процесс ФАБО используется для устранения задиров и снижения скачков при трении кареток и направляющих.

В Германии фирма Пайсиг (г. Цвиккау) применяет ФАБО цилиндров мотоциклетных и автомобильных двигателей.

В последнее время в России В.И. Балабанов и С.М. Мамыкин разработали процесс ФАБО для повышения колесных пар железнодорожного транспорта. Колеса вагонов, обработанные ФАБО, проходят испытания на железной дороге Германии с 1995 г. с положительным результатом.

Помимо сказанного, по данным проф. Г. Польцера, процесс ФАБО апробирован в Германии в следующих узлах трения машин и механизмов:

— цилиндрах двух- и четырехтактных двигателей;
— торцевых поверхностях шатунов;
— поршнях виброгасителей и гидравлических цилиндрах;
— ползунах сцепных муфт;
— упорных кольцах валов водяных насосов грузовиков и тракторов;
— толкателях дизельных двигателей;
— дорожках качения шарикоподшипников и роликоподшипников;
— валах, на которых возникала фреттинг-коррозия в результате вибрации;
— толкателях дизельных двигателей;
— ведомых валах, работающих в подшипниках скольжения гидравлических двигателей.

1.3. Эффективность технологического процесса ФАБО

Исследования свидетельствуют, что процесс ФАБО позволяет:

— снизить время приработки деталей в 1,5...2 раза;
— исключить задиры поверхностей трения деталей;
— повысить несущую способность сочленений;
— защитить поверхности трения от водородного изнашивания;
— снизить температуру трения и продлить период работы узла трения при выключении подачи смазки;
— уменьшить коэффициент трения и тем самым снизить потребление топлива двигателями внутреннего сгорания до 3%;
— продлить срок службы подшипников качения до образования усталостных повреждений.

К особенностям процесса ФАБО относятся:

— чрезвычайно низкий расход материала;

— низкий расход механической энергии;

— безвредность для окружающей среды;

— короткая продолжительность нанесения покрытия (несколько секунд и минут) с помощью автоматизированного оборудования;

— стабильное и хорошее качество покрытия;

— замена дорогостоящих способов обработки поверхности;

— экономическая целесообразность при большом и небольшом числе изделий.

1.4. Возможность использования метода в технике

Технологический процесс ФАБО целесообразно использовать с целью повышения ресурса следующих машин и механизмов:

— цилиндро-поршневой группы, кривошипно-шатунного и другого механизмов автомобильных, танковых, корабельных двигателей (как основных, так и вспомогательных) и других двигателей (самоходных установок, тягачей, тракторов и др.);

— артиллерийских орудий с целью исключения хромирования и повышения живучести внутренней поверхности ствола;

— узлов трения самолетов (шасси, планера, управления, деталей гидравлической системы, подшипников электродвигателей и др.);

— электрических слаботочных контактов электрооборудования и т.д.

2. Металлоплакирующие смазочные материалы, реализующие режим безызносного трения

2.1. Общая характеристика смазочных материалов

На основе эффекта безызносности были разработаны металлоплакирующие смазочные материалы, применение которых позволяет повысить ресурс машин и механизмов. Характерной особенностью таких смазочных материалов является то, что в их составе находятся присадки, которые состоят из порошков мягких металлов (меди, олова, свинца), сплавов и их окислов, солей и комплексных соединений металлов, металлоорганических соединений.

При использовании металлоплакирующих смазочных материалов реализуется эффект безызносности, который проявляется в том, что на трущихся поверхностях деталей в процессе работы узлов трения формируется тонкая трудно поддающаяся окислению защитная самовосстанавливающаяся металлическая пленка из введенных в смазку присадок. Толщина пленки составляет от нескольких атомных слоев до 1...4 мкм. В литературе защитную пленку называют сервовитной от латинских слов servo-witte — спасать жизнь.

Образование сервовитной пленки в процессе трения обусловлено его созидательным характером, определяемым интенсивностью обмена узла

трения с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов металла (может быть порошка металла или его окисла), из которых формируется сервовитная пленка, защищающая поверхности трения от изнашивания. Свойства металлической сервовитной пленки, "рожденной" в процессе трения, иные, чем у металла, полученного при восстановлении руды. Пленка имеет рыхлую структуру, пориста, в ней почти отсутствуют дислокации и имеется много вакансий.

Наибольшее распространение получили металлоплакирующие смазочные материалы, образующие медную или оловянную сервовитные пленки.

Некоторые металлоплакирующие присадки к маслам и смазки, реализующие эффект безызносности:

— металлоплакирующая присадка МКФ-18; изготавливается на Новокуйбышевском нефтемаслозаводе;

— смазка Атланта; применяется в тяжелонагруженных узлах самолетах типа Су; изготавливается на Московском экспериментальном нефтемаслозаводе.

— смазка "Сервовит"; применяется в узлах трения судов Латвии, изготавливается фирмой "Балт-Мобил", г. Вентспилс.

— присадка "М-Пульс 2000"; применяется в узлах трения автомобилей и тракторов, а также механизмах железнодорожного транспорта; изготовляется корпорацией "Сплав" в г. Москве;

— смазка СМП-5; изготавливается Пензенским техническим университетом; применяется для машин легкой промышленности;

— смазка "Свинцоль 01"; применяется многие годы на самолетах-истребителях типа МИГ; изготавливается нефтемаслозаводом в г. Санкт-Петербурге;

— смазка «Медея»; применяется в узлах трения в машинах горнодобывающего и перерабатывающего оборудования в Казазстане;

— металлоплакирующая присадка к маслам «Валена»; применяется в машинах горнодобывающего и перерабатывающего оборудования в Казахстане.

За рубежом нашли применение такие металлоплакирующие присадки, как Металл-5 (Швейцария, Франция); Лубри-фильм –металл (Италия, Франция); Слюдер 2000 (Англия); Реповер (США) и др.

Проведенные сравнительные испытания российских и зарубежных металлоплакирующих смазочных материалов показали, что российские смазочные материалы не уступают зарубежным, а некоторые из них даже превосходят.

2.2. Области использования металлоплакирующих смазочных материалов

Металлоплакирующие смазочные материалы были апробированы и используются в следующих машинах и механизмах:

— самолеты типа Су (подшипники скольжения и качения тяжелонагруженных узлов трения шасси планера, управления);

— тяжелое оборудование завода “Уралмаш” (основные узлы трения, подшипники, зубчатые передачи экскаваторов, редукторов, станков для бурения, металлургического оборудования);

— оборудование и машины морского флота (подшипники скольжения, подшипники качения палубного оборудования, дизели морских судов);

— тяжелые автокраны (ролики и направляющие поворотного устройства);

— строительные и дорожные машины (основные узлы трения экскаваторов, бульдозеров);

— шахтные комбайны типа 1К-1У, К-103 и др. (зубчатые зацепления редукторов);

— пневмопрядильные машины типа ЛПМ-120МС (подшипники скольжения и качения);

— прядильные машины типа БД-200М69 (подшипники качения и скольжения);

— швейное и обувное оборудование (механизмы челнока, игловодителя, узлы трения кривошипа, кулисы и др.);

— автомобили ЗИЛ, ГАЗ, КамАЗ, МАЭ и др. (подшипники качения, скольжения, цилиндры двигателей);

— тракторы Д-50, СМД-60 и др. (подшипники качения, скольжения, цилиндры двигателей);

— дизели тепловозов (картерная смазка кривошипно-шатунного механизма);

— технологическое оборудование (подшипники качения, скольжения, направляющие и др.)

2.3. Экономическая эффективность от применения металлоплакирующих смазочных материалов

Использование металлоплакирующих смазочных материалов позволяет повысить долговечность узлов трения (в 2...3 раза), снизить потери на трение (на 30...200%) и тем самым повысить КПД машин и оборудования, уменьшить расход смазочных материалов (в 2...3 раза), увеличить период между смазочными работами (до 3 раз).

Металлоплакирующие смазочные материалы обладают лучшими противозадирными и противоизносными характеристиками, чем у обычных смазочных материалов, что подтверждают приведенные ниже графики (рис. 4.3).

Как видно из рисунка, при добавке в смазочный материал 10% меди и 0,1% 8-оксихинолина интенсивность изнашивания образцов резко снижается.

Металлоплакирующие смазки увеличивают контактную прочность колец подшипников качения по данным 4-го ГПЗ приблизительно на 18%.

В Германии имеются металлоплакирующие смазочные материалы, которые могут работать как при низких, так и при повышенных температурах (–40...+1100°). Такой смазочный материал имеет своей основой бетонитовую глину в сочетании с коллоидальными мелкодисперсными частицами меди и свинца.

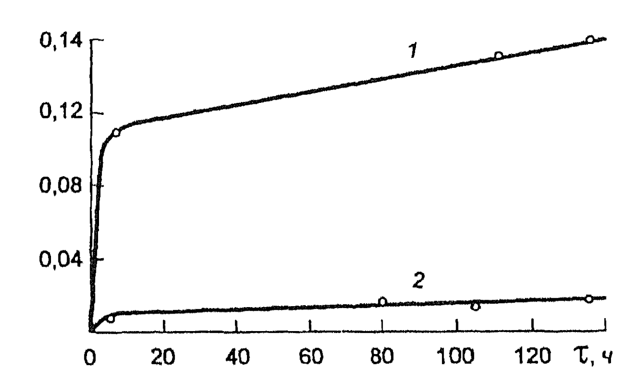


Рис. 4.3. **Зависимость износа *I* пары трения качения ролик—ролик от времени работы *t* (сталь ШХ-15, HRC 62-64, P = 6 МПа, v = 0,2 м/с, коэффициент проскальзывания 20%) при использовании смазок:**
1 — литол; *2* — литол + 10% меди + 0,1% оксихинолина

2.4. Возможности использования металлоплакирующих смазочных материалов в технике

Металлоплакирующие смазочные материалы должны применяться во всех тяжелонагруженных узлах трения, от работы которых зависит ее надежность и ресурс машин. Можно указать, что только на военных самолетах металлоплакирующие смазочные материалы "Атланта", "Свинцоль 01" уже применяются более 25 лет и зарекомендовали себя с положительной стороны.

В нашей стране специалисты из институтов по смазочным материалам в течение многих лет занимают негативную позицию в отношении металлоплакирующих смазочных материалов, реализующих эффект безызносности.

Основными положениями такой позиции являются:

— ограниченность ресурсов цветных металлов и их высокая стоимость;

— вредное воздействие вводимых присадок на физико-химические и эксплуатационные свойства смазочных материалов. Имеется в виду влияние меди и других металлов на усиление окисления смазочного материала, особенно для теплонапряженных двигателей внутреннего сгорания.

Что касается дефицитности и дороговизны цветных металлов, то во многих присадках содержание меди или олова составляет сотые доли процента. Эффективность же присадок весьма велика. Кроме того, металлоплакирующие смазочные материалы рекомендуется применять только в узлах трения, от работы которых зависит надежность и ресурс машины или механизма.

Давно известно традиционное применение солей меди в качестве активных катализаторов, и исходя из этого наличие меди действительно может привести к ускорению окисления масла. Однако позднее была об-

наружена способность органических соединений меди к антиокислительному действию. Было показано, что соединения меди, вводимые в масла, могут проявлять как каталитическую активность, так и ингибировать процесс окисления, а также улучшать триботехнические свойства масел. Необходимо отметить, что введение в масла металлоплакирующих присадок снижает температуру трущихся деталей, что само собой должно сказаться на уменьшении степени окисления масла в механизмах.

Негативное отношение к разработке и производству металлоплакирующих смазочных материалов со стороны руководящих работников институтов по производству и применению смазочных материалов привело к тому, что в нашей стране ни один смазочный материал отечественного производства не экспортируется за границу, а российский рынок заполнен многочисленными металлоплакирующими препаратами зарубежного производства.

Попытки работников НИИ по нефтепереработке вместо металлоплакирующих присадок применить дисульфид молибдена с целью повышения качества смазочных материалов не привели и не могут привести к значительному эффекту повышения ресурса техники. Дисульфид молибдена оказывает коррозионное действие особенно в открытых узлах трения и малую адгезию с металлической поверхностью. Этот препарат не создает прочной сервовитной пленки.

В связи с изложенным напрашивается вывод о необходимости широкого применения металлоплакирующих смазочных материалов в узлах трения многих отраслей техники, что приведет к повышению ее ресурса и надежности.

3. Безразборное восстановление двигателей внутреннего сгорания

3.1. Сущность безразборного восстановления двигателей

Двигатели внутреннего сгорания выходят из строя главным образом (до 80%) в результате износа цилиндров и деталей шатунно-кривошипного механизма. Более всего изнашиваются цилиндры и поршневые кольца, подшипники и шейки коленчатых валов.

В результате износа указанных деталей падает мощность двигателя, увеличивается расход горючего и смазочного материала, возрастает в несколько раз загазованность вредными газами окружающей среды.

По данным Международного конгресса "Экологические проблемы больших городов; инженерные решения", проходившего в Москве в 1996 г., до 70% всех вредных выбросов в атмосферу городов России падает на автомобильный транспорт.

Разработанные методы повышения износостойкости деталей машин, основанные на эффекте безызносности, позволяют без разборки двигателей восстановить их компрессию и повысить их мощность, снизить расход топлива и смазки и уменьшить загазованность окружающей среды. Это означает фактически восстановить изношенный двигатель без разборки.

Эффект безызносности при восстановлении двигателя без разборки играет следующую роль. Металлоплакирующие смазочные материалы, введенные в двигатель, создают на поверхностях трения сервовитные пленки толщиной 1...4 мкм. На этих сервовитных пленках образуются еще дополнительные пленки в виде серфинг пленок, состоящие из металлорганических соединений. Эти пленки образуются в результате взаимодействия лигандов смазочного материала и сервовитной пленки. Таким образом, образование на обеих контактирующих поверхностях металлических и металлоорганических пленок уменьшает зазор в сочленениях деталей, повышает компрессию в цилиндрах двигателя, снижает расход топлива и масла. После восстановления двигателя без его разборки снижается содержание вредных газов на выхлопе двигателя.

Технология восстановления двигателей автомобилей без разборки состоит из следующих последовательных работ:

— двигатель, подлежащий восстановлению, проходит внешний осмотр, проверяется его пробег, замеряется давление в цилиндрах и содержание CO на выхлопе. Все данные записываются в журнал регистрации;

— заводится двигатель и на малых оборотах в патрубок забора воздуха через карбюратор подается тонкой струей металлоплакирующая смесь (присадка) в объеме 50...100 см^3 в зависимости от марки двигателя и его степени изношенности. Работа двигателя продолжается 10...15 мин;

— после остановки двигателя вывертываются свечи и в цилиндры вливается 10...15 см^3 металлоплакирующей присадки и вновь запускается двигатель на 10...15 мин;

— в масло двигателя вносится металлоплакирующая присадка объемом 0,3% по отношению к объему масла.

Двигатель после указанных процедур эксплуатируется. В первые часы его необходимо дать повышенную нагрузку. После пробега автомобиля с восстановленным двигателем 25...30 тыс. км двигатель вновь проверяется на компрессию в цилиндрах и замеряется содержание CO на выхлопе.

3.2. Где используется данный метод

Разработанная технология безразборного восстановления изношенных двигателей начиная с 1990 г. в небольшой степени использовалась разными организациями как в России, так и в других странах. В России метод безразборного восстановления двигателей использовался в Русском научно-технологическом центре безызносности (к.т.н. В.Н. Быстров). В последние годы этот метод применяется в корпорации ЛДТ " Сплав" В.И. Балабановым и С.М. Мамыкиным. В г. Тольятти метод применяется Г.И. Истоминым. В Московском Государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина метод используется В.Ф. Пичугиным. В Московском государственном агроинженерном университете им. В.П. Горячкина метод освоен В.В. Стрельцовым. В Польше в г. Гданьске восстанавливает двигатели без разборки М. Круль. В Латвии в г. Вентспилсе базразборным восстановлением двигателей автомобилей занимается Н. Н. Коз-

ловский. Однако перечисленные специалисты частных фирм и отдельных институтов работают по проблеме безразборного восстановления двигателей в порядке личной инициативы.

Ни одно министерство и ведомство, несмотря на важность разработанной технологии в деле повышения ресурса машин, не ведет плановых работ по данному вопросу. Это происходит в результате неосведомленности руководителей отдельных министерств и предприятий, а также незаинтересованности идти в ногу с развитием научно-технического прогресса в решении проблем повышения ресурса техники и экологии. Работы ведутся разрозненно лишь по инициативе специалистов различных организаций.

3.3. Эффективность метода безразборного восстановления машин

Анализ результатов работ по безразборному восстановлению как карбюраторных, так и дизельных двигателей автомобилей свидетельствует, что такая технология повышает и выравнивает компрессию по цилиндрам и уменьшает содержание СО в выхлопных газах и также снижает расход топлива и масла. В табл. 4.1 приведены результаты по безразборному восстановлению 3 двигателей легковых автомобилей, взятые из рабочего журнала в организации РНТЦ г. Москва.

Таблица 4.1

Результаты по безразборному восстановлению двигателей автомобилей (данные взяты из рабочего журнала РНТЦ)

Дата проведения работы, № автомобиля, пробег, км	Компрессия Р до обработки	Компрессия Р после обработки	Содержание СО, %	
			до обработки	после обработки
24.01.90	8	8,5		
№ 481	8,5	8,5		
56290	9	9	3	1
	6,5	8,5		
31.01.90	8,75	8,5		
№ 732 М	7,25	8		
64794	8	8	3	1,5
	6	8		
16.02.90	8,5	8,5		
№ 390	8,5	8,5		
29033	4,5	8,5	3	1
	6,5	8		

В Польше за последние годы М. Крулем восстановлено без разборки двигателей автомобилей более 1500. В Латвии Н.Н. Козловским восстановлено свыше 150. В России общее количество двигателей, восстановленных В.И. Балабановым, В.Ф. Пичугиным, Г.А. Истоминым, С.Н. Пись-

менюком, Э.А. Чизмычаном, О.В. Чекулаевым, С.А. Соколом и др. специалистами не подсчитано.

3.4. Возможное применение метода в технике

Все двигатели внутреннего сгорания, подлежащие капитальному ремонту, целесообразно после потери ими компрессии, снижения давления масла в смазочной системе или повышенного дымления подвергать безразборному восстановлению. Материальные затраты на безразборное восстановление по сравнению с капитальным ремонтом мизерные, а время на проведение такого восстановления составляет не более одного часа. Двигатель не снимается с автомобиля или другой машины.

По мнению автора безразборное восстановление двигателей внутреннего сгорания является наиболее необходимым в сельскохозяйственном производстве, технике северных районов, в военной технике, особенно во время полевых работ, ведения военных действий, когда нет времени и средств на снятие двигателя с боевой машины и отправки его в капитальный ремонт.

4. Предложения по дальнейшему использованию методов повышения ресурса машин и оборудования

При заинтересованности промышленных предприятий в повышении ресурса машин и оборудования на основе рассмотренных в этой главе методов члены отделения "Проблем безызности машин и механизмов" Академии проблем качества РФ могут предложить:

— консультации по методам повышения ресурса машин, основанных на эффекте безызносности;

— передачу ноу-хау по применению и внедрению методов повышения износостойкости деталей машин;

— нанесение покрытий на опытные образцы;

— передачу опытных металлоплакирующих смазочных материалов;

— посредничество при покупке станков и приспособлений для производства ФАБО цилиндров и шеек коленчатых валов;

— предоставление современной триботехнической измерительной и испытательной техники;

— участие в составлении и в проведении научных программ по повышению ресурса техники.

...Природа в ее простой истине является
более великой и прекрасной, чем любое
создание человеческих рук, чем все
иллюзии сотворенного духа.

Р. Майер

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПРОШЛОЕ И БУДУЩЕЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ПРИ ТРЕНИИ (ЭФФЕКТА БЕЗЫЗНОСНОСТИ)

1. Регистрация открытия

Избирательный перенос (ИП) при трении (эффект безызносности) есть явление природы, оно признано научным открытием и зарегистрировано в Государственном Реестре открытий СССР под № 41 от 13 сентября 1966 г. с приоритетом от 12 ноября 1956 г. (по дате представления статьи Д.Н. Гаркунова и И.В. Крагельского "Об атомарном схватывании материалов при трении" в редакцию журнала "Доклады АН СССР") [4].

Формула открытия опубликована в "Бюллетене изобретений, открытий и товарных знаков", 1968 г., № 17 в следующей редакции:

"Обнаружено, что при трении медных сплавов о сталь в условиях граничной смазки, исключающей окисление меди, происходит явление избирательного переноса меди из твердого раствора медного сплава на сталь и обратного ее переноса со стали на медный сплав, сопровождающееся уменьшением коэффициента трения и приводящее к значительному снижению износа пары трения" [10].

Установленное явление было названо "Избирательный перенос при трении (эффект безызносности)".

Открытием в СССР признавалось установленное неизвестное ранее объективно существующая закономерность, свойства и явления материального мира.

Открытия проходят широкие предварительные обсуждения среди научных учреждений Академии наук и других организаций, а также экспертизу Комитета Совета министров по делам изобретений и открытий.

На базе открытия (решение научной проблемы) делаются изобретения (решение технической задачи). Понятия открытия и изобретения не отождествляются; они находятся под охраной государства. За все время регистрации открытий по трибологии зарегистрировано 3 открытия: Избирательный перенос при трении (1956); Аномальное низкое трение (1969); Водородное изнашивание металлов (1992). Всех изобретений зарегистрировано около 2 миллионов по всем отраслям знаний.

При оценке открытия Экспертный совет тщательно изучает практическое значение открытия. Это определяется изобретениями, сделанными на базе открытия. Так, в 1966 г. на основе явления избирательного переноса были признаны два *основополагающие изобретения*, которые вошли в описание открытия:

1. "Способ придания поверхности металлов трущихся пар противозадирных свойств" (авторское свидетельство № 115744 от 23 апреля 1958 г.). Авторы Гаркунов Д.Н. и Лозовский В.Н.

2. "Металлоплакирующая смазка" (авторское свидетельство № 179409 от 14 мая 1962 г.). Авторы Гаркунов Д.Н., Лозовский В.Н., Шимановский В. Г.

Первое авторское свидетельство в последние годы стало называться как процесс финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО).

Без указанных изобретений признание явления избирательного переноса было бы весьма проблематичным. Однако без открытия ИП ни Гаркунов, ни Лозовский и Шимановский не сделали бы отмеченных изобретений.

До 1958 г. никто не имел понятия, что благодаря переносу металла (схватывания, считающимся самым вредным процессом при трении) можно снизить трение и значительно уменьшить износ трущейся пары.

Массоперенос металлов при трении во всех литературных источниках считался вредным и весьма опасным явлением. По вопросам схватывания металлов при трении в СССР было защищено 3 докторских диссертации (Н.Л. Голего, А.П. Семенов, С.Б. Айбиндер). Понятие же избирательного переноса при трении в литературе отсутствовало.

Что касается авторского свидетельства № 179409, то в СССР термина "металлоплакирующая смазка" также не существовало. Специалисты по смазочным материалам могут возразить, что задолго до открытия ИП в технике применялись порошки меди и свинца в пластичных смазках и что якобы это и были металлоплакирующие смазки. Действительно, порошки меди и свинца применялись и применяются в настоящее время в пластичных смазках для резьбовых и уплотнительных соединений, но не более. В этих соединениях роль порошков иная, чем в металлоплакирующих смазочных материалах. Здесь при однократном завинчивании резьбы порошки не подвергаются растворению, в последующей работе они окисляются. Поскольку окись металла по объему больше, чем сам металл, она уплотняет резьбу. Твердость окислов меди не более ее самой и при свинчивании резьбы они не повреждают стальную поверхность [14].

На основе рассмотрения указанных авторских свидетельств экспертный совет дал следующую формулировку практического значения открытия: "Практическое значение открытия заключается в том, что впервые в кинематических парах осуществлен процесс самовосстановления изношенного слоя. Это устраняет возникающий в процессе трения зазор, обычно выводящий машины из строя. В кинематических парах машин реализован процесс регенерации истираемого слоя, имеющего место в подвижных сочленениях живых организмов". Это было опубликовано в 1968 г., а приоритет относится к 1956 г., т.е. к году 45-летней давности, когда о безразборном восстановлении машин и механизмов и не помышляли. Только несколько лет тому назад в печати появились сведения о технологиях по безразборному восстановлению двигателей внутреннего сгорания и других механизмов, используя изобретения, созданные на базе от-

крытия ИП [2]. Процесс механического "зашпаклевывания" порошками поверхностей трения был известен.

Помимо отмеченных двух основополагающих изобретений на основе ИП были разработаны изобретения и патенты, касающиеся новых износостойких материалов (М.В.Голуб, Е.Н. Грискин, Л.А. Кольцов, А.С. Кужаров, Б.М. Асташкевич, Н.В. Акулич, В.Г. Мельников, А.К. Прокопенко, В.И. Балабанов и многие др.) [8].

Все эти изобретения были сделаны с одной целью — создать на поверхности трущихся деталей во время их работы металлическую (сервовитную) пленку из меди или олова с особыми свойствами.

Необходимо иметь в виду и то обстоятельство, что в одних случаях легко реализовать на практике образование сервовитной пленки на трущихся поверхностях, а в других это не всегда удается. Многое зависит от кинематики узла трения. Лучше образуется сервовитная пленка в узлах трения с возвратно-поступательным и возвратно-вращательным движениями, нежели при поступательном движении. Иногда требуется увеличение удельных давлений и т.п. В некоторых случаях реализуется ИП только на 10%, но и это бывает экономически выгодным применить на практике то или иное изобретение.

В первые годы исследований ИП многие специалисты требовали указать конкретные условия его реализации на практике: по применяемым материалам, смазкам, удельным давлениям, температурам и скоростям скольжения. Этого нельзя было сделать не только в 50-е годы, но и теперь. С каждым годом реализация использования ИП расширяется. Делаются новые изобретения и патенты. Все зависит от условий работы сочленений, используемых материалов и многих других факторов. В авиационной технике одни условия, морском флоте при смазывании узлов трения морской водой — другие, в домашнем холодильнике — третьи и т.д.

Так, например, при проведении процесса ФАБО в 50...70-е годы стальные трущиеся детали для реализации избирательного переноса натирали латунью (шарнирно-болтовые сочленения самолетов российского производства). Такие поверхности трения при смазке ЦИАТИМ-201, покрытые латунью, образовывали при работе сервовитную пленку. Казалось, что ФАБО не имеет прямого отношения к ИП. Однако в последние годы в Германии проф. Г. Польцер [11], а в России к.т.н. Г.И. Эжиев разработали такие технологические среды для процесса ФАБО, что при обработке цилиндров на их рабочих поверхностях сразу образуется сервовитная пленка меди, хотя и в этом процессе используется латунь. Таким образом, границы использования ИП расширяются.

2. Исследования механизма явления ИП и использование его в промышленности

Для того, чтобы оценить применение научного открытия в промышленности, необходимо знать, на каком предприятии и в какой степени используются сделанные на его основе изобретения.

Такую оценку может дать предприятие или Министерство, если в нем имеется несколько предприятий, использующих данное изобретение, или на более высоком уровне – Совет Министров страны.

В 1991 г. Совет Министров РСФСР от 16 апреля за № 202 принял постановление присудить группе научных работников и инженерам премию в размере в 20 тыс. руб. *"за разработку, исследование и* ***внедрение методов по повышению сроков службы машин****, технологического оборудования и транспортных средств предприятий бытового обслуживания* ***на основе безызносности"*** (выделено автором).

Руководителем этой работы был проф. А.К. Прокопенко.

В военно-морском флоте решена крупная научно-техническая проблема — созданы подшипники скольжения, способные работать в режиме избирательного переноса в морской воде (руководитель работы М.Б. Рубин)[13].

В военной авиационной технике в течение 25 лет применяются металлоплакирующие смазки: Свинцоль 01 и Свинцоль 02 производства Санкт-Петербургского маслозавода им. Шаумяна и смазка "Атланта" производства Московского экспериментального маслозавода (руководители работ С.И. Дякин [7], М.Н. Шепер [15]).

Имеются достижения в области повышения ресурса машин и в других отраслях техники: химическом машиностроении [3], легкой промышленности [6], сельскохозяйственной технике [5], краностроении [5] и др.

Для более полного представления об использовании ИП в промышленности рекомендуется прочитать следующие книги, сборники и журналы:

— Избирательный перенос при трении и его экономическая эффективность. Издательство Московский дом научно-технической пропаганды, 1972, 250 с.;

— Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. Машиностроение, 1977, 212 с.;

— Долговечность трущихся деталей машин. Сб. научных статей под ред. Д.Н. Гаркунова. М. Машиностроение. Вып.1, 1986, 263 с.; Вып. 2, 1987, 302 с.; Вып. 3, 1988, 270 с.; Вып. 4, 1990, 351 с.; Вып. 5, 1990, 354 с.;

— Эффект безызносности и триботехнологии. Международный научно-инженерный журнал. 16 номеров. Выходит с 1992 г. в Москве.

К изучению механизма ИП и его использованию на практике (имеется в виду разработка и применение изобретений на его основе) были привлечены ученые различных специальностей:

— металловеды: Л.М. Рыбакова (докторская диссертация), Л.И. Куксенова (докторская диссертация);

— химики: Ю.С. Симаков (докторская диссертация), В.Г. Бабель (докторская диссертация), А. Фирковский (докторская диссертация);

— физико-химики: А.С. Кужаров (докторская диссертация), В.И. Савенко, Ю.А. Хрусталев;

— механики: В.Г. Куранов (докторская диссертация), В.Г. Мельников (докторская диссертация);

— специалисты отдельных отраслей промышленности: авиационная техника – В.Н. Лозовский (докторская диссертация); военно-морской

флот – Б.М. Рубин (докторская диссертация); железнодорожный транспорт – Б.М. Асташкевич (докторская диссертация); сельскохозяйственная техника – В.В. Стрельцов (докторская диссертация), В.И. Балабанов (докторская диссертация), В.И. Цыпцын (докторская диссертация), М.Н. Ерохин (докторская диссертация), П.И. Носихин (докторская диссертация); нефтегазовая промышленность – В.Ф. Пичугин (докторская диссертация) и др.

Для изучения одного из главных вопросов ИП — строение сервовитной пленки (пленки мягкого металла с особой структурой, находящейся под воздействием ПАВ) в Институте Машиноведения РАН Л.М. Рыбаковой и Л.И. Куксеновой была разработана специальная методика. Пленку изучали методом скользящего рентгеновского луча и в результате установили уникальную ее структуру. Пленка в ее верхней части имеет очень мало дислокаций и много вакансий, что делает ее структуру полужидкой. (Книга авторов “Структура и износостойкость металла”. М. Машиностроение, 1982. 212 с.).

Многие специалисты по смазкам и маслам выражали сомнения в возможности использования металлоплакирующих смазочных материалов в теплонапряженных двигателях внутреннего сгорания и др. механизмах. Они утверждали, что сервовитная пленка (особенно медная) ускорит окисление масла.

Давно известно традиционное применение солей меди в качестве активных катализаторов. Однако позднее была обнаружена способность органических соединений меди к антиокислительному действию. Показана возможность усиления эффективности некоторых органических антиоксидантов путем координации их функциональных групп на соединениях меди. (Докторская диссертация В.Г. Бабель). Автор работы на основе широкого круга как теоретических, так и экспериментальных исследований по окислению масел пришла к выводу, что в зависимости от ряда факторов, соединения меди, вводимые в масла, могут проявлять и каталитическую активность и ингибировать процесс окисления, при этом улучшая трибологические свойства масел. Эта работа заслушивалась как в России, так и на конференциях в Польше, Латвии и Болгарии [1].

При рассмотрении механизма избирательного переноса при трении необходимо учитывать образование двух пленок: металлической пленки на поверхности трения (сервовитной пленки) и образование на ней так называемой сёрфинг-пленки, которая наблюдалась автором еще в конце 50-х годов как “желеобразная медь” [12]. Было установлено, что она влияет на снижение трения, но рассчитать количественную величину этого снижения не удавалось. Серфинг-пленка не является обычным смазочным материалом, она возникает в виде молекул комплексных соединений и “живет” вместе с сервовитной пленкой, помогая осуществлять обмен атомами с внешней средой. Молекула комплексного соединения создается из “свободных” атомов и кластеров на поверхности в местах выхода дислокаций и лиганд (активных молекул), содержащихся в смазочном материале. Комплексное соединение неустойчиво и часть его после выхода из зоны контакта распадается (см. работы А.С. Кужарова [9] и др.)

Комплексные молекулы, ассоциируясь в серфинг-пленки, удерживаются межмолекулярными связями. Подобные образования известны. Их изучает супрамолекулярная химия — химия межмолекулярных связей, рассматривающая структуру и функции ассоциаций химических веществ.

Для простоты рассуждений и в популярных изданиях в начале 70-х годов образование серфинг-пленки нами рассматривалось как своеобразная трибополимеризация, что недалеко от истины. Кроме этого, эффект ИП объясняется избирательным растворением поверхности при трении, эффектом Ребиндера, электрофорезом, процессами самоорганизации, большим количеством вакансий в сервовитной пленке, малым числом дислокаций и др. явлениями.

Однако вернемся к трибополимеризации. В семидесятые годы в России много надежд было на реализацию в зоне контакта деталей трибополимеров, образующихся из мономеров, вводимых в масла, т.е. на применение трибополимерных присадок.

Для ускорения и расширения работ в этом направлении был создан специальный научный совет при Комитете по науке и технике Совета Министров СССР. Однако исследования показали, что трибополимеризация на контакте при граничном трении в углеводородных смазках протекает с большими трудностями (экранирует окисная пленка) и данная работа оказалась бесперспективной. Научный совет был закрыт и работы в головных институтах — Институте физической химии РАН и Электрогорском филиале ВНИИ НП — прекращены. Что касается ИП, то здесь картина иная. Безокислительное трение и высокая активность поверхности создают весьма благоприятные условия для полимеризации и образования координационных соединений.

В последние годы А.А. Поляковым был опубликован ряд статей по изучению избирательного переноса при трении как диссипативной структуры. Эти весьма важные работы с большой убежденностью показали, что эффект безызносности, в отличие от граничного трения, представляет собой диссипативную структуру со всеми ее особенностями и относится к синергетике. На базе работ А.А. Полякова можно эффект избирательного переноса отнести к классу таких явлений, как сверхпластичность и сверхпроводимость, а также сравнить его с ячейками Бенара и когерентным поведением частиц в лазерах. Главной особенностью избирательного переноса является его способность обмениваться с окружающей средой энергией и веществом, что при граничном трении невозможно. Работам А.А. Полякова посвящен полностью один номер журнала "Эффект безызносности и триботехнологии" № 3—4. 1996 г.

К настоящему времени по ИП опубликовано свыше 1500 статей, сборников, книг [8]. Проведено 38 семинаров, конференций, встреч ученых стран СНГ. Семинары проходили также в Великобритании, Германии, Польше, Болгарии, Литве, Латвии. По ИП защищено более 65 диссертаций из них 15 докторских. В 1995 г. в Академии проблем качества РФ было создано отделение "Проблем безызносности машин и механизмов", в которое вошли известные специалисты в области трения и износа машин не только России, но и Германии, Польши и Казахстана.

При научном Совете по трению и смазочным материалам РАН так, же имеется Секция "Избирательный перенос при трении".

3. Признание учеными явления эффекта безызносности

Изучение явления избирательного переноса при трении проходило по известной схеме, как и многие другие явления природы. Вначале были установлены экспериментальные факты, которые не были объяснены имеющимися познаниями в области трения и износа материалов. Пришлось строить гипотезы, фантазировать, выдвигать различные предположения, давать новые термины, расширять круг экспериментальных исследований. Все это, как и в любом новом деле, вызывало у ряда научных работников негодование: эффект безызносности ассоциировался с "перпетуум-мобиле".

Открытия обычно сразу не принимают, объявляя их курьезом, фикцией, потому лишь, что они не согласуются с существующей научной позицией, они переросли ее. Так русский философ А. Сухотин объясняет, что "*научное сообщество, еще не успев подняться в своем подавляющем большинстве до новых высот, испытывает при виде их душевный дискомфорт от того, что свежие идеи выпадают из общего хора, рождая недоумения, насмешки, протест*". Ученый утверждает, что "*в этом случае действует своего рода "закон сохранения невежества". Этот закон выражает инерцию мышления*".

Здесь уместно привести также суждения физика Московского государственного университета Ю.Ю. Климонтовича о признании синергетики как науки, опубликованные им в книге "Без формул о синергетике". Автор пишет: "*В современном науковедении признано, что развитие науки носит пульсирующий характер. Это ясно из общих соображений. Приведем наблюдения некоторых ученых за процессом научного познания. Немецкий психолог К. Левин писал: "Вначале новую идею считают бредом, не стоящим внимания. Затем наступает время, когда можно услышать самые разнообразные возражения, например: новая теория слишком фантастична или лишь новая терминология, она неплодотворна и просто не нужна. Наконец каждый утверждает, что он всегда как будто бы придерживался этой теории. Обычно это означает достижение последней стадии перед всеобщим признанием...*" "*Вот другая точка зрения, в ней меньше психологизма, но больше горечи, ибо принадлежит она не стороннему наблюдателю, а основоположнику квантовой теории М. Планку: "Великая научная идея редко внедряется путем постепенного убеждения и обращения своих противников.... В действительности дело обстоит так, что оппоненты постепенно вымирают, а растущее поколение сразу осваивается с новой идеей*".

Однако ради справедливости следует указать и на следующую фразу из книги Ю.Ю. Климонтовича "*Консерватизм научной среды — это своеобразный защитный механизм науки. Основная его функция — сдерживать необоснованные притязания ученых. Но всегда ли этот механизм работает исправно?* Ставит вопрос ученый и отвечает на него: "*Здесь*

помогают количественные показатели: это публикации, защита диссертаций, признания за рубежом и т.д." (подчеркнуто автором).

Большую помощь в признании ИП как научного открытия оказал выдающийся физико-химик XX века академик П.А. Ребиндер. Он сразу увидел связь эффекта адсорбционного понижения прочности и избирательного переноса при трении. В предисловии к книге "Избирательный перенос в узлах трения". М. Издательство "Транспорт" 1969 г. (авторы Д.Н. Гаркунов, И.В. Крагельский, А.А. Поляков) П.А. Ребиндер пишет: "*Избирательный перенос при трении металлов — интереснейшее явление, относящееся к физико-химической механике — науке, рассматривающей процессы деформации и разрушения твердых тел с учетом физико-химического влияния среды"*...

Далее П.А. Ребиндер пишет: *"Самопроизвольное формирование контактных поверхностей в узлах трения, работающих практически без износа, — сложное явление, которое заслуживает дальнейшего всестороннего глубокого изучения. Однако уже сейчас можно утверждать, что авторы предлагаемой брошюры открыли новую страницу в науке о трении и износе".*

В журнале "Эффект безызносности и триботехнологии" № 3...4 за 1994 г. опубликована статья ученика академика П.А. Ребиндера В.И. Савенко "Роль эффекта Ребиндера в реализации режима избирательного переноса", в которой убедительно показана связь ИП и эффекта Ребиндера.

Известный ученый механо-химик Германии Г. Хайнике в книге "Трибохимия". Издательство Мир, 1987 г. 534 с. в разделе "Защитные пленки, образуемые за счет избирательного массопереноса (эффект Гаркунова)" пишет: "*Использование защитных пленок дает большой экономический эффект. Возможности применения эффекта Гаркунова выходят далеко за пределы систем бронза–сталь. Сюда относятся, в частности, и такие распространенные системы, как пластмасса – сталь и сталь– сталь".*

Немецкие специалисты по физике самоорганизующихся процессов В. Эбелинг, А. Енгель, Р. Фестель в книге "Физика самоорганизующихся процессов" [16] приводят схему избирательного процесса и образования диссипативной структуры в зоне фрикционного контакта. Авторы считают, что часть энергии трения расходуется на протекание физико-химических процессов в поверхностных слоях, что уменьшает или исключает износ.

Ведущие ученые США в области трибологии Д. Давсон и О. Вард в проспекте о советском журнале "Трение и износ" высоко оценили работы по ИП и водородному износу. В начале 80-х годов они писали: "Советские ученые и инженеры проявляют большую активность в изучении новых важных направлений развития триботехники:

— избирательный перенос (эффект нулевого износа);

— водородный износ;

— финишная антифрикционная безабразивная обработка".

В заключение этого раздела ниже приведен еще один отзыв о ИП известного специалиста по трению, износу и смазкам Соединенных штатов Америки д.т.н., проф.Д. Ригни. В книге "Трибология. Исследования и

приложения. Опыт США и стран СНГ" Издательство Машиностроение. 1993, 452 с. Д. Ригни в разделе "Избирательный перенос" пишет:

"Возможным путем сосредоточить внимание на эффекте избирательного переноса является проведение специальной международной конференции. Менее амбициозным, но полезным актом была бы организация специальных секций по избирательному переносу на проводимых конференциях. Возможна также организация совместного проекта типа программы YAMAS".

Далее Д. Ригни пишет: *"Подводя итог, хотелось бы отметить, что улучшение атмосферы международного сотрудничества создает новые возможности прогресса в области триботехники. Можно предположить перспективность концентрации международных усилий на исследование фрикционного переноса, в частности — избирательного переноса".*

4. Будущее эффекта безызносности

В настоящем разделе необходимо дать перспективу развития исследований по избирательному переносу (эффекту безызносности) и увязать эту перспективу с исследованиями, намеченными на следующее столетие японскими и американскими специалистами по новым конструкционным материалам.

Узел трения, работающий в режиме избирательного переноса, в некоторой степени напоминает узел трения сустава живого организма. При избирательном переносе материал одной детали отделен от материала сопряженной детали металлическим слоем – сервовитной пленкой. На ней находится серфинг-пленка (металлорганическая пленка). Такое строение поверхностей трения аналогично строению поверхностей трения суставов живых организмов.

Природа выработала универсальный узел трения — один для человека, животного, птицы и рыбы. Здесь сопряженные поверхности костей покрыты хрящем, на котором имеется полимерная пленка, пропитанная синовинальной жидкостью. Работают в суставах одноименные материалы, причем мягкий по мягкому. Природа создала только одну "конструкцию" закрытого узла трения, использовав один материал и одну смазку, сосредоточив внимание на надежности и универсальности узла. Одна поверхность не может быть агрессивной по отношению к другой поверхности. При режиме трения в условиях избирательного переноса происходит то же самое. Следует отметить, что человечество при своем развитии и при совершненствовании научно-технических разработок не раз использовало аналоги явлений, выработанных за миллионы лет природой. В связи с изложенным можно утверждать, что в России впервые начаты работы по созданию узлов трения, которые по своему принципу напоминают суставы живых организмов. Тут вспоминаются знаменитые слова выдающегося автрийского физика Л. Больцмана, который говорил, что *"процесс познания есть отыскание аналогий".*

В последние 6...7 лет в материаловедении появился новый термин – "интеллектуальные" материалы. Это ознаменовало новую фазу в конструировании материалов. Работы проводятся в Японии и Америке. Как отмечается в зарубежной печати, к настоящему времени материалов, которые во всех отношениях можно было бы считать "интеллектуальными", не существует.

Отмечается, что введение понятия "интеллектуальности" предопределяет развитие материаловедения на все последующее столетие и, возможно, на значительно более долгий период времени, поскольку выдвигает качественно новые задачи и соответственно требует принципиально новых методов их решения. В связи с этим дальнейшее развитие технологий и приобретение или сохранение научного и технического лидерства, как считают японские специалисты, возможно лишь при незамедлительном выделении всего комплекса исследований в этой области в качестве приоритетных.

Японские специалисты считают, что "интеллектуальные" материалы представляют собой логический результат исторического развития материалов в ряду: конструкционный материал – композиционный материал – функциональный материал – "интеллектуальный материал".

Важнейшим достоинством концепции является использование в качестве исходных точек ее развития аналогий между свойствами будущих материалов и функциями живого организма. Эти аналогии содержат в себе стимул для дальнейшего ее совершенствования, что позволило авторам провести экстрополяцию основных положений японской концепции и предложить в качестве заключительного этапа создание "интеллектуального " изделия, позволяющего обеспечить наиболее полную реализацию возможностей "интеллектуального" материала, и вслед за этим (или одновременно) создание искусственного "живого" организма.

Создание "интеллектуальных" материалов, как свидетельствуют публикации, заключается в теоретическом и экспериментальном изучении механизмов структурных преобразований в материалах, их связей с выражаемыми функциями и в последующем конструировании необходимых механизмов, а затем и самих материалов.

В качестве методов получения и контроля тонкой структуры материалов на данном этапе предполагается использовать существующие и достаточно отработанные технологии получения тонких пленок, эпитаксиальную технологию, методы выборочного травления, различные виды электронной микроскопии, спектроскопические и дифракционные методы анализа и т.п.

Иностранные специалисты, учитывая фундаментальность проблемы, считают необходимым для ее решения привлечение специалистов из различных отраслей науки: физики и химии полимеров, металлов, композиционных материалов; электроники, информатики, биологии, физиологии и др.

Научных работников по изучению эффекта безызносности можно отнести к специалистам по созданию "интеллектуальных" узлов трения. Взять хотя бы метод восстановления изношенных узлов трения машин

без их разборки. Это напоминает выздоровление живого организма после какой-либо травмы.

Открытие и развитие процессов самоорганизации сказалось на всех областях науки и техники и затрагивает интересы ученых многих специальностей. В книге " Нарушая покой вселенной" известный американский физик Фримен Дайсон, размышляя о будущем человечества, предвидит возникновение "зеленой" технологии, построенной на тех же принципах самоорганизации, что и живая природа. Ф. Дайсон противопоставляет ее традиционной "серой" технологии, в основе которой лежит жесткий механический чертеж и пассивное следование командам.

Процесс самоорганизации в триботехнике наиболее ярко проявляется в компрессоре домашнего холодильника, где изнашивание трущихся поверхностей деталей автоматически компенсируется образованием сервовитных пленок из материала трубок охладителя компрессора.

Следует признать, что это лишь самое начало работ по данному направлению в области триботехники. Однако уже в данное время можно утверждать, что при решении такой важной проблемы на первый план теоретических исследований должны быть поставлены самоорганизующиеся процессы в зоне фрикционного контакта, диффузионно-вакансионный механизм сдвига, действие эффекта Ребиндера, электрофорез, образование координационных соединений, т.е. процессы и явления, которые и характеризуют избирательный перенос.

Экспериментальные и теоретические работы должны проводиться по следующим направлениям:

— создание новых высокоэффективных смазочных композиций, реализующих в зоне контакта трущихся деталей устойчивых сервовитных и серфинг-пленок;

— разработка новых методов по изучению строения и физико-химических свойств образующихся пленок (помимо уже известного рентгеновского скользящего пучка);

— разработка конструкций механизмов по проведению ФАБО деталей узлов трения без разборки трущихся сочленений и приспособлений по введению в машины смазочных композиций, реализующих эффект ИП.;

— проведение стендовых и эксплуатационных испытаний по оценке эффективности методов реализации ИП при безразборном восстановлении изношенных узлов машин и механизмов.

Развитие исследований по изучению эффекта избирательного переноса как диссипативной структуры.

Успешное решение поставленной проблемы будет зависеть от тесной связи как теоретических, так и экспериментальных работ, проводимых учеными и инженерами разных специальностей.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Итак, в дополнение ко многим ранее вышедшим публикациям по эффекту безызносности, разработанным по этому вопросу, авторским свидетельствам и патентам, кандидатским и докторским диссертациям, вышла еще одна книга «Триботехника износ и безызносность», в которой дан анализ двух противоположных явлений износа и безызносности.

Можно надеяться, что эта книга дополнительно привлечет внимание преподавателей, студентов, инженеров-механиков и специалистов по триботехнике к новому направлению в области повышения ресурса и снижения эксплуатационных расходов машин и оборудования. Изменятся и теоретические представления о трении, износе и смазке деталей.

За прошедшие 45 лет с момента открытия избирательного переноса при трении (эффекта безызносности) было проведено много конференций, семинаров и совещаний, на которых проводились дискуссии о механизме безызносности и ее использовании на практике.

И, несмотря на все это, до настоящего времени не все специалисты по триботехнике признают существование эффекта безызносности и тем более его применения в практических целях. Одни из них в силу неосведомленности, другие в результате неспособности воспринимать новое, а причина для иных видна из слов Л.Н. Толстого:

— *«Мне дают всякого рода лестные эпитеты: реформатора, великого человека и т.д. И в то же время не признают за мной самого простого здравого смысла... Я не реформатор, не философ, не апостол, но самое меньшее из достоинств, которое я могу себе приписать и приписываю, это — логичность и последовательность.*

— Ты говоришь человеку ясное, простое, казалось бы нужное и обязательное для каждого человека, он ждет только, скоро ли ты кончишь... ты удивляешься, откуда такое непонимание... отчего это? А от того, что он чует, что твоя мысль, признавая неправильным его положение, разрушает то положение, которым он дорожит больше чем правдивостью мысли. И оттого он не понимает, не хочет понять то, что ты говоришь. В этом одном объяснение всех царствующих нелепых, называемых науками рассуждений. Все оттого, что люди все разделяются на два рода: для одних мысль управляет жизнью, для других — наоборот. В этом одном ключ к объяснению безумия мира».

Эти слова, несмотря на пессимизм, для нас смертных могут служить в определенной степени утешением. Такова жизнь.

ЛИТЕРАТУРА

К главе 1. Механизм избирательного переноса при трении и его закономерности

1. **Алехин В.П.** Физика прочности и пластичности поверхностных слоев металлов. М.: Наука, 1983. 280 с.
2. **Бабель В.Г.** Композиции, улучшающие антиокислительные свойства и смазочную способность масел. Автореферат докторской диссертации. Ленинградский технологический институт, 1986. С. 47.
3. **Бабель В.Г., Байрамуков М.Д.** Об использовании композиций, содержащих галогениды металлов переменной валентности и исследовании механизма их смазочного действия \\ Сб. долговечность трущихся деталей машин. Машиноведение. Вып. 2, 1987. С. 7—19.
4. **Балабанов В. И., Мамыкин С.М., Хрусталев Ю.А.** и др. Специальная механическая обработка поверхностей катания колесной пары. Железные дороги мира. 6/97. 1997. С. 3—5.
5. **Балабанов В.И.** Финишная антифрикционная безабразивная обработка деталей дизелей. Тракторы и сельхозмашины, 1996, № 2. С. 23—25.
6. **Барчан Г.П., Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г.** Влияние строения сложных эфиров на процессы избирательного переноса.// Химия и технология топлив и масел. № 7. 1979. С. 36—39.
7. **Боуден Ф.П., Тейбор Д.** Трение и смазка. / Пер с англ. под ред. И.В. Крагельского. М.: Машиностроение, 1960. 151 с.
8. **Буше Н.А., Копытко В.В.** Совместимость трущихся поверхностей. Изд-во Транспорт. 181. 223 с.
9. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 327 с.
10. **Гаркунов Д.Н., Лозовский В.Н.** Влияние фрикционного бронзирования и латунирования на качество поверхности // Сб. Качество поверхности деталей машин. № 5. М.: Издательство АН СССР, 1961. С. 386—389.
11. **Гаркунов Д.Н., Польцер Г., Марчак Р.** Две триботехники и одна цель. Эффект безызносности и триботехнологии. № 1. 1993. С. 21—39.
12. **Гарновский А.Д.. Бушкова Е.С.** Влияние металлокомплексных и комплексообразующих добавок на свойства масел и смазок // Эффект безызносности и триботехнологии. № 2. 1992. С. 49—54.
13. **Гегузин Я. Е.** Очерки о диффузии в кристаллах. М. Издательство "Наука", 1974. 252 с.
14. **Голуб М.В.** Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля. Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 1. С. 24—39.
15. **Гречко В.О.** Разработка медьсодержащих антифрикционных покрытий на основе волокон политетрафторэтилена // Автореферат кандидатской диссертации. Новочеркасск, 1982. 26 с.
16. **Грискин Е.Н.** Новый способ получения износостойкой, антифрикционной поверхности и ее экономическая эффективность // Материалы семинара. МДНТП., 1972. С.183—188.

17. **Денисов Е.Т., Мицкевич Н.И., Агабеков В.Е.** Механизм жидкофазного окисления кислородсодержащих соединений. Минск: "Наука и техника", 1972. 347 с.
18. **Долговечность** трущихся деталей машин. Выпуск. 1. 1986, 162 с.; Вып. 2. 1987, 303; Вып. 3, 1988. 271 с.; Вып. 4, 1990, 350 с.; Вып. 5, 1990, 376 с.
19. **Елин Л.В.** Взаимное внедрение поверхностных слоев металлов, как одно из причин изнашивания при несовершенной смазке. Сб. "Трение и износ в машинах". № 13. М.: Изд-во АН СССР, 1959.
20. **Задошенко Е.Г.** Трибологические и физико-химические особенности самоорганизации при трении в режиме безызносности. Автореферат кандидатской диссертации. Ростов-на-Дону, 1996. С. 26.
21. Защита от водородного износа в узлах трения. М.: Машиностроение, 1980. 134 с.
22. **Зиновьев В. М.** и др. Способ создания антифрикционного медного слоя. Авторское свидетельство № 410211. – Бюллетень "Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки". 1974. № 1.
23. **Зуидема Г.Г.** Эксплуатационные свойства смазочных масел. Гостоптехиздат, 1957. 170 с.
24. **Иванова В.С.** Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука. 158 с.
25. **Избирательный** перенос при трении. Сб. Изд-во Наука, 1975. 85 с.
26. **Каракозов Э.С.** Соединения металлов в твердой фазе. Металлургия. 1976. 262 с.
27. **Костецкий Б.И.** Трение, износ и смазка в машинах. Киев.: Техника, 1979. 396 с.
28. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1962. 382 с.
29. **Красиков С.Г.** Исследование износостойкости узлов трения бытовых машин и повышение их долговечности с использованием избирательного переноса // Автореферат кандидатской диссертации. Московский технологический институт, 1972. 21 с.
30. **Кужаров А.С., Сучков В.В., Власенко П.П.** и др. Исследование комплексообразования меди и никеля при трении. ЖФХ, 1981. Т. 5. № 10. С. 2588—2592.
31. **Кужаров А.С.** Физико-химические основы смазочного действия в режиме избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 2. С. 3—14.
32. **Кужаров А.С. Задошенко Е. Г.** Самоорганизация в химических и трибологических системах // Безызносность. Вып.; Ростов-на-Дону, 1996. С. 3—20.
33. **Кужаров А.С.** Комплексообразование при трении в режиме избирательного переноса // Материалы междунар. Конф. "Трение, износ и смазочные материалы". Ташкент. ТПИ. 1985. С. 48—49.
34. **Кужаров А.С., Барчан Г.П., Чуваев В.В.** Образование координационных соединений на трущихся поверхностях металлов. ЖФХ, 1977. Т. 1, № 11. С. 2949—2951.
35. **Кужаров А.С., Онищук Н.Ю.** Металлоплакирующие смазочные материалы // Сб. Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 3. 1988. С. 96—143.
36. **Кужаров А.С., Чуваев В.В., Барчан Г.П.** Журнал физ. химии. 1977. Т. 51, № 11. С. 2949—2951.
37. **Кужаров А.С., Чуваев В.В., Меринов В.В.** и др. Исследование структуры граничного слоя и влияние комплексообразующих присадок на триботехни-

ческие свойства пары трения медный сплав – сталь. Трение и износ. Т. 8, № 5. 1987. С. 851—861.

38. **Курлов О.Н.** Конструкторско-технологические основы возбуждения избирательного переноса в узлах трения машин. В кн. "Избирательный перенос в узлах трения машин". М.: Машиностроение, 1982. С. 111—126.
39. **Кутьков А.А., Гречко В.О., Кужаров А.С.** и др. Исследование механизма трения меднофторопластового композита // Трение и износ. 1980. Т. 1, № 6. С. 993—999.
40. **Кутьков А.А., Барчан Г.П.** Исследование механизма трения при смазывании высокомолекулярными фторсодержащими полимерами в парах сталь – сплавы меди // Сб. Избирательный перенос в узлах трения. Моск. Дом научно-техн. пропаганды, 1971. С. 23—29.
41. **Лосиков Б.В., Пучков Н.Г., Энглин Б.А.** Основы применения нефтепродуктов. Гостоптехиздат, 1959. 326 с.
42. **Марчак Р., Кужаров А.С., Гузик Я., Задощенко Е.Г.** Исследование трибологических проявлений самоорганизации в системе латунь—глицерин—сталь // Трение и износ, 1995, Т. 16, № 6. С. 878—886.
43. **Марчак Р.** Физико-химические аспекты избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. № 1. 1993. С. 42—49.
44. **Мур Д.** Основы применения трибоники. М.: Мир, 1978. 488 с.
45. **Мюке В.** Избирательный перенос рабочего материала в подшипниках скольжения // В кн. Исследования по триботехнике. М.: Изд. НИИ информации по машиностроению, 1975. С. 125.
46. **Научно-технический** прогресс. Словарь. М.: Изд-во политической литературы, 1987. 364 с.
47. **Николис Г., Пригожин И.** Познание сложного. М.: Мир, 1990. 512 с.
48. **Оберемко А.В., Перченко А.А., Денисов Е.Т.** и др. Роль спиртов в торможении реакций окисления парафинов стеаратом марганца. Нефтехимия, 1971. Т. 2. С. 229—233.
49. **Орлов П.И.** Смазка легких двигателей. ОНТИ, 1937. 462 с.
50. **Осипов А.И.** Самоорганизация и хаос. М.: Знание (физика), 1986. 64 с.
51. **Польцер Г., Фирковский А., Ланге И.И.** и др. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос // Сб. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. Вып. 4. 1990. С. 86—122.
52. **Поляков А . А.** Трение на основе самоорганизации // Эффект безызносности и триботехнологии. 1996. № 3—4. С. 47—119.
53. **Поляков А.А.** Опыт исследования диссипативной структуры избирательного переноса в металлической пленке при трении (обзор) // Эффект безызносности и триботехнологии. 1996. № 3—4. С. 30—44.
54. **Поляков А.А., Гаркунов Д.Н., Симаков Ю.С.** и др. Защита от водородного износа в узлах трения. М.: Машиностроение, 1980. 133 с.
55. **Поляков А.А.** К вопросу о синергетике, деформации, износе и энтропии металлических материалов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1987, № 2. С. 11—18.
56. **Поляков А.А.** Роль серфинг-пленки в избирательном переносе // Трение и износ. 1991. Т. 12. № 1. С. 109—112.
57. **Поляков А.А., Рузанов Ф. И.** Трение на основе самоорганизации. М.: Наука, 1992. 135 с.
58. **Поляков А.А., Гаркунов Д.Н.** О механизме избирательного растворения и переноса при трении меди и медных сплавов со сталью в глицерине // Сб.

статей "Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа". Издание АН СССР. М.: 1971. С. 63—71.

59. **Поляков А.А., Курлов О.Н.** Влияние напряженного состояния поверхности трения на возбуждение и режим установившегося трения при избирательном переносе // Сб. Исследование смазочных материалов при трении. Изд-во Наука, 1981. С. 214.
60. **Проблемы** безызносного трения в машинах. Изд. WYDAWNICTWO. RADOM. 12—13 mai 1993.
61. **Прокопенко А.К.** Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения. М.: Легпромбытиздат. 1987. 104 с.
62. **Прокопенко А.К., Красиков С.Г., Симаков Ю.С.** Проявление избирательного переноса в узлах трения компрессоров // Сб. статей "Применение избирательного переноса в узлах трения машин. М.: Изд-во Стандарты, 1976. Т. 2. С. 68—70.
63. **Розенберг Ю.А., Виноградова И.Э.** Смазка механизмов машин. Гостоптехиздат, 1960. 170 с.
64. **Рубин М.Б.** Контактные процессы в режиме избирательного переноса при смазке водой // Сб. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 43—49.
65. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** Структура поверхностных слоев металла при трении // Поверхность. Физика, Химия, Механика. 1983. № 8. С. 144—153.
66. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** Металловедение в науке о трении и изнашивании // Металловедение и термическая обработка металлов. 1965. № 5. С. 12—23.
67. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** О рентгеноструктурном исследовании поверхностных слоев металла при трении в условиях избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 2. С. 46—56.
68. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 209 с.
69. **Рыбакова Л.М.** Рентгенографический метод скользящего пучка лучей и его возможности при исследовании избирательного переноса поверхностей твердых тел // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997. № 1. С. 54—66.
70. **Северденко В.П., Точинский Э.И.** Структура тонких металлических пленок. Минск.: Наука и техника. 1968. 209 с.
71. **Симаков Ю.С.** Физико-химические процессы при избирательном переносе // В кн. "Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения". М.: Машиностроение, 1982. С. 88—111.
72. **Синергетика.** Сб. статей / Пер. с англ. под ред. Б.Б.Кадомцева. М.: Мир, 1984. 247 с.
73. **Трение и износ материалов** на основе полимеров / Белый В.А., Свириденок А.И., Петраковец М.И. и др. Минск: Наука и техника, 1976. 430 с.
74. **Труды Всесоюзной конференции** по трению и износу в машинах. Том 1. Издание АН СССР, 1939, 609 с. Так же т. 2. 1940. 412 с.
75. **Тум Г.** Надежность и износ на примере избирательного переноса // В кн. Исследования по триботехнике. М.: Изд. НИИ информации по машиностроению, 1975. С. 265—272.
76. **Физика** тонких пленок / Под общ. ред. Г. Хасса: в 4-х томах. М.: Мир, 1967—1970.
77. **Фирковский А.** (ПР), **Польцер Г.** (ФРГ). Структурирование трибологической системы в условиях избирательного переноса // Сб. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. Вып. 5. 1990. С. 15—29.

78. **Фирковский А.** (ПР). Роль смазочного материала в процессе избирательного переноса // Сб. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. Вып. 5. 1990. С. 145—153.
79. **Хаккен Г.** Синергетика. М.: Мир, 1985. 415 с.
80. **Хрущов М.М.** Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. Изд-во АН СССР, 1946. 343 с.
81. **Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г., Барчан Г.П.** Трибохимические процессы в органических средах // Вестник машиностроения. 1984. № 2. С. 47—49.
82. **Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г., Бурлов А. С., Гарновский А.Д.** Исследование трибохимических реакций, приводящих к формированию смазочного слоя при избирательном переносе // Эффект безызносности и триботехнологии. № 3—4. 1994. С. 64—75.
83. **Шелепин Л.А.** Вдали от равновесия // Новое в жизни, науке, технике. Физика. М.: Знание. 1987. С. 30—80.
84. **Эбелинг В.** Образование структур при неравновесных процессах. М.: Мир, 1973. 204 с.
85. **Finkin M. F.** What Happencs When Parts Wear. "Machine Design", 1970, № 3, p. 148—154.
86. **Hornung E.** Stand der Forschung auf dem Gebiet der Reaktionsschichten – bildung bei mechanischer Beanspruchung faster Korper (1. Folge). Schwirungstechnik, 1973, № 4, s. 244—248.
87. **Festschmierstoffager** aus metallischen Grundwerstoff mit eingdagertem Trockenschmierstoff. "Deutsch. Hebe. – und Fordertechn, 1970, 16. № 2, s. 35—41.
88. **Bearing material.** Chartered Mechanic Engineering, 1973, 20, № 5, p. 3.
89. **New low** — friction bearing material. Ship Repair Maint. 1973, № 6, p. 17.
90. **Permaglide low** – frictiction bearing material. Mach/ and Prod. Tng. 1973. 122, № 3158, p. 696.
91. **Rogers** use of Cooper to prevent scuffing in diesed engines/ Wear. 1972, vol, 22, № 2, p. 245—258.
92. **Dwyer M. J.** The formation of polimerie films directly on rubbing surfance wear. Wear, мщд. 26, 173, p. 369—392.
93. **Festschmierstoflager** aus metallischen Grundwerkstoff mit eingertem Trockenschmierstoff. "Maschine", 1970, 24, № 5. S. 35—37.

К главе 2. Применение избирательного переиоса в узлах трения

1. **Анисимов В.В.** Повышение износостойкости режущих инструментов методом избирательного переноса // В кн.: Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С.196—201.
2. **Балабанов В.И., Мамыкин С.М. Хрусталев Ю.А.** и др. Специальная антифрикционная механическая обработка поверхностей катания колесной пары // Железные дороги мира. № 6/97. 1997. С. 3—4.
3. **Богданов В.М.** Снижение интенсивности износа гребней колес и бокового износа рельсов // Железнодорожный транспорт. 1992. № 12. С. 30—34.
4. **Бондюгин В. М., Быченков В. В.** Ответы на вопросы (14 –17) по триботехнике "Эффект безызносности и триботехнологии". № 1. 1992. С. 67—69.
5. **Вайнштейн В.Э., Трояновская Г.И.** Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. М.: Машиностроение, 1968. 180 с.

6. **Волков К.П.** Исследование влияния избирательного переноса при трении на повышение эксплуатационных характеристик и прирабатываемость глобоидных редукторов // В кн.: Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 173—176.
7. **Воронков Б.Д. , Шадрин В.Г.** Повышение долговечности химического оборудования методом избирательного переноса при трении // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 3. Машиностроение, 1988. С. 195—227.
8. **Воронков Б.Д.** Защита от водородного изнашивания концевых опор валов аппаратов с перемешивающими устройствами // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 4. Машиностроение, 1990. С. 302—315.
9. **Воронков Б.Д.** Эффект безызносности при повышении ресурса и надежности машин и аппаратов химических производств // Эффект безызносности и триботехнологии. № 1. 1997. С.11—19.
10. **Воронков Б.Д., Рахманин А.Г.** Разработка методов уменьшения водородного изнашивания узлов трения химического оборудования // Эффект безызносности и триботехнологии. № 2, 1992. С. 33—45.
11. **Воронков Б.Д., Шадрин В.Г., Петрова И.В.** Состояние и перспективы использования эффекта избирательного переноса при трении в химическом оборудовании (обзорная информация) // ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. Химическое и нефтеперерабатывающее машиностроение, серия ХМ-1, 1985. 36 с.
12. **Гаркунов Д.Н., Лозовский В.Н.** Влияние фрикционного бронзирования и латунирования на качество поверхности // Труды семинара по качеству поверхности. М.: Наука, 1961. № 5. С. 386—391.
13. **Гаркунов Д.Н.** Повышение износостойкости деталей самолетов. Оборонгиз, 1969. 138 с.
14. **Гаркунов Д.Н., Лозовский В.Н., Шимановский В.Г.** Авторское свидетельство № 179409 // Бюллетень изобретений и открытий. № 5. 1966. С. 50.
15. **Гнусов Ю.В.** Антифрикицонные самосмазывающиеся материалы Афтал и Меткан // Международный конгресс "Защита–95". М., ноябрь (20—24) 1995 г. Тезисы докладов. Государственная академия нефти и газа им. И. М. Губкина. С. 156.
16. **Голуб М. В.** Автореферат докторской диссертации " Основы комплексного решения проблемы повышения износостойкости, надежности долговечности уплотнений насосов магистральных нефтепроводов". Гомель, Институт механики металлополимерных систем. 1992. 52 с.
17. **Голуб М.В.** Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля (технология получения, исследование и применение) // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994. № 1. С. 24—39.
18. **Грискин Е.Н.** Износостойкий материал для торцевых уплотнений электробуров // В сб. "Повышение износостойкости на основе избирательного переноса". Машиностроение, 1977. С. 107–113.
19. **Грискин Е.Н.** Новый способ получения износостойкой антифрикционной поверхности и его экономическая эффективность // В кн. Избирательный перенос при трении и его экономическая эффективность. МДНТП, 1972. С.183—188.
20. **Грискин Е.Н.** Эффект безызносности в релитовых торцевых уплотнениях. Сб. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. Вып. 5. С. 51—57.
21. **Дзегиленок В.Н.** Повышение срока службы деталей металлообрабатывающего оборудования с использованием эффекта безызносности // Тезисы

докладов Международного конгресса "Защита-95" М., ноябрь (20—24) 1995. Московский институт нефти и газа им. И.М. Губкина. С. 161.

22. **Дмитриев Б.С., Зиновьев В.М.** и др. Использование избирательного переноса для повышения долговечности судовых узлов трения // Технология судостроения. 1973. № 8. С. 21—23.
23. **Дякин С.И.** Испытания металлоплакирующих смазочных материалов применительно к тяжелонагруженным кинематическим парам трения скольжения // В кн. Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения. М.: Машиностроение, 1982. С. 134—162.
24. **Дякин С.И.** Опыт повышения надежности и ресурса узлов трения с использованием металлоплакирующих смазочных материалов // Эффект безызносности и триботехнологии. № 3—4. 1994. С. 3—9.
25. **Дякин С.И., Филатова Т.П.** Некоторые концепции применения материалов в тяжелонагруженных трибосопряжениях // В кн. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1986. Вып. 2. С. 19—31.
26. **Евдокимов Ю.А., Майба И.А.** Износ железнодорожной техники // Материалы симпозиума "Технология и транспорт". Кн. 1. Рыбинск. 1995 С. 35—37.
27. **Заявка** на изобретение № 95109459/04 "Смазка-покрытие РАПС и устройство для ее нанесения в открытые узлы трения" / Ерошенко А.И., Богданов В.М., Козубенко В.Г., Шаповалов В.В., Майба И.А., Щербак П.Н.
28. **Идельсон А.С.** и др. Шестеренные устройства для выгрузки растворов и расплавов полимеров из реакционной аппаратуры. — Оборудование для синтеза и обработки пластических масс и синтетических каучуков // Сб. научных трудов НИИхиммаша, М.: 1980. С. 95—101.
29. **Избирательный перенос** в тяжелонагруженных узлах трения / Под. ред. д.т.н. Гаркунова. М.: Машиностроение, 1982. 205 с.
30. **Козлов Л. К.** Опыт применения избирательного переноса в узлах трения судовых машин и механизмов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 3—4. С. 22—27.
31. **Колесников И.М., Пичугин В.Ф.** О механизме высокой износостойкости контактирующих поверхностей с металлосодержащими пленками, сформировавшимися в процессе трения // Поверхность Физика, химия, механика. 1988. № 7. С. 132—141.
32. **Кольцов Л.А.** Исследование свойств уретанового каучука СКУ-7, модифицированного полиакрилатом // Каучук и резина. 1983. № 7. С. 8—9.
33. **Кольцов Л.А.** Манжетные уплотнения из композиционного полиуретана, работающие в режиме избирательного переноса // В кн.: Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1985, вып. 1. С. 54—71.
34. **Кольцов Л.А.** Эластичные уплотнители насосов, работающие в режиме избирательного переноса. В кн.: Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1986, вып.2. С. 120—126.
35. **Кольцов Л.А., Абдрахманов Ф.Х., Ахмадулин В.Г.** Реализация избирательного переноса в деталях из композиционных полиуретанов // Тезисы докладов Международной научной конференции " Трение, износ и смазочные материалы". Т. 5. Ташкент, 1085. С. 15—17.
36. **Кремешный В.М., Беляков А.В.** Производственная инструкция. Пи. 1.2. 450-91 "Технологический процесс фрикционно-химического нанесения износостойкого покрытия на стальные детали". М.: ВИАМ, 1992. 16 с.
37. **Кремешный В.М., Беляков А.В.** Технологическое обеспечение эксплуатационной надежности и ресурса узлов трения // Эффект безызносности и триботехнологии. № 3-4. 1994. 10—18.

38. **Кремешный В.М., Тепляшин А.В.** Повышение износостойкости стальных сферических шарниров // Эффект безызносности и триботехнологии. № 1. 1992. С. 18—37.
39. **Куранов В.Г., Кузьмиченко Б.М.** Работа слаботочных скользящих контактов при наличии микропереноса // Сб. Избирательный перенос и его экономическая эффективность. М.: Московский дом научно-технической пропаганды, 1972. С. 215—223.
40. **Лозовский В.Н.** Фрикционное латунирование стальных деталей // Прогрессивные мероприятия по борьбе с коррозией. Вып.6. Институт технико-экономической информации. М.: 1961. 16 с.
41. **Макаров Ю.Ф., Турчков Е.В.** О возможности реализации избирательного переноса в узлах трения металлорежущих станков // В кн.: Вопросы обработки металлов резанием. Иваново, 1987. С. 90—83.
42. **Макаров Ю.Ф., Турчков Е.В.** Исследование механо-химических процессов при трении медистых чугунов // В кн.: Физико-химическая механика процессов резания. Иваново, 1976. С. 72—77.
43. **Макаров Ю.Ф.** Исследование процессов трения и изнашивания серых чугунов // Автореферат дисс. канд. техн. наук. Калининский политехнический институт.1980. 16 с.
44. **Мельников В.Г.** Избирательный перенос при трении металлостеклянных материалов в растворах щелочей и управление этими процессами // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 2. С. 20—26.
45. **Мельников В.Г.** Опыт разработки и применения антифрикционных порошковых материалов с активными нейтральными наполнителями // Эффект безызносности и триботехнологии.1994. № 3—4. С. 19—25.
46. **Павлов В.Т.** Автореферат кандидатской диссертации. “ Исследование работоспособности композиционных материалов в осевых опорах скольжения серийных турбобуров. М.: МИНХ ГП, 1978. 22 с.
47. **Петерсон В.Х.** Колесо железнодорожного транспорта. Патент США № 33272550.
48. **Петросянц А.А., Пичугин В.Ф.** Повышение износостойкости бурового оборудования и инструмента реализацией избирательного переноса в промышленных растворах. Теория трения, износа и проблемы стандартизации // Сборник материалов Всесоюзной научной конференции. Брянск, 1987. С. 245—250.
49. **Пиневич Е.В.** Повышение ресурса гребней колес путем лубрикации их твердой смазкой // Автореферат кандидатской диссертации. РИИЖТ, Ростов-на-Дону, 1997. 22 с.
50. **Пичугин В.Ф.** Повышение износостойкости узлов трения бурового оборудования и инструмента // Сб. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. Вып.3. С. 177—184.
51. **Пичугин В.Ф., Мкртчан С.М.** Повышение износостойкости бурового оборудования и инструмента на основе использования избирательного переноса. ВНИИОЭНГ, 1980. С. 31.
52. **Пооперационная технология** ремонта самолета Ту-124. ОГТ завода 407 ГА. 1967.
53. **Прилипко А.** На практике не подтвердилось. “Гудок” от 21 января 1998 г.
54. **Прокопенко А.К.** Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения. М.: Легпромиздат, 1987. 103 с.
55. **Прокопенко А.К.** Методы повышения износостойкости элементов технологического оборудования на основе избирательного переноса // В кн.: До-

лговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. Вып. 2. 1987. С.126—134.

56. **Прокопенко А.К.** Особенности проведения триботехнических испытаний конструкционных и смазочных материалов в режиме избирательного переноса // В кн.: Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. Вып. 1. 1986. С. 207—215.
57. **Прокопенко А.К., Францев В.Н., Хомяк О.Н., Кот А.Н.** Повышение долговечности механизма вязания замочных трикотажных машин применением металлоплакирующего смазочного материала // В кн.: Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. Вып. 4. 1990. С 186—189.
58. **Рабинович Л.В., Казакова Н.Н., Брегман Т.П.** Использование явления переноса золота в узлах трения приборов // Сб. Избирательный перенос и его экономическая эффективность. М.: Московский дом научно-технической пропаганды, 1972. С. 229—232.
59. **Рекомендации** по применению методов повышения износостойкости деталей бытовых машин и технологического оборудования предприятий бытового обслуживания на основе избирательного переноса. М.: Московский технологический институт, 1983. 18 с.
60. **Романов В.И.** Об оптимальном содержании добавок жирных кислот в традиционных машинных маслах // В кн.: Новые методы повышения износостойкости узлов трения на основе избирательного переноса. Киев, 1978. С. 14—15.
61. **Рубин Б.М.** Контактные процессы в режиме избирательного переноса при смазке водой // В кн.: Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 43—49.
62. **Рубин Б.М.** Саморегулирование контактных процессов при избирательном переносе в воде // Сб. Избирательный перенос при трении. Изд-во "Наука", 1975. С. 19—23.
63. **Рубин Б.М., Зиновьев В.М.** Свойства сервовитного слоя при избирательном переноса в воде // Материалы семинара "Избирательный перенос и его экономическая эффективность". Московский дом научно-технической пропаганды. М.: 1972. С. 53—58.
64. **Руководящий технический материал.** Методы повышения износостойкости узлов трения двигателей внутреннего сгорания транспортных средств предприятий бытового обслуживания населения на основе избирательного переноса. РТМ 02.101—88. М.: Московский технологический институт, 1988. 16 с.
65. **Румянцев Г.И.** Фрикционное латунирование деталей топливной аппаратуры // Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М. Машиностроение, 1977. С. 155—159.
66. **Симаков Ю.С., Михин Н.М.** О механизме избирательного переноса // В кн.: Избирательный перенос при трении. М.: Наука, 1975. С 6—9.
67. **Соинова М.Н.** Влияние поверхностно-активных веществ на процессы избирательного переноса // В кн.: Избирательный перенос в узлах трения. М.: 1971. С. 69—75.
68. **Суранов Г.И.** О механизме снижения водородного изнашивания деталей путем их магнитной обработки // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 2. С. 27—32.
69. **Харламенко В.И., Голуб М.В., Сухов Ф.А.** и др. Опыт эксплуатации торцевых уплотнений центробежных насосов. М.: ВНИИ ОЭНГ, 1971. 64 с.

70. **Шепер М.Н.** Испытания металлоплакирующих смазочных материалов, их разработка и внедрение // В кн.: Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения. Машиностроение, 1982. С. 162—171.
71. **Шепер М.Н., Шимановский В.Г.** Опыт применения металлоплакирующих смазок // Материалы семинара. Избирательный перенос и его экономическая эффективность. Московский дом научно-технической пропаганды. М.: 1972. С. 157—166.
72. **Шимановский В.Г.** Применение металлоплакирующих смазок в узлах трения самолетов // В кн.: Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 95—98.
73. **Шимановский В.Г., Шепер М.Н.** Авторское свидетельство № 255465 // Бюллетень изобретений и открытий № 33, 1969. С. 71.
74. **Эффективность смазывания** рельсов/Железные дороги мира, № 6, 1996. С. 55—57 данные J.Kramer /Railway Track s Structures. — 1994. — N 7. — P. 11—17.
75. **Stone D.H., Kalay S.F.** The application of modern surfase engineering to rails wheels.// Railway Track s Structures. — 1996. — N 6. — P. 13—15.
76. **Guidat A.** The fundamental benefits of preventive rail grinding.// Rail Engineering International.— 1996.V.25.— N 1. — P. 4—6.
77. **Steinle H., Seemann W.** Uber die Kupferplattierung in Kaltemaschinen. – Kaltetechnik, 1951, № 8, s. 194—197.
78. **Steinle H., Seemmann W.** Ursache der Kupfer- plattierung in Kaitemaschinen.— Kaitetechnik, 1953, № 4, s. 90—94.
79. **Steinle H.** Versuche uber Kupferplattierung an Kaltemaschinen—Kaltetechnir, 1955, № 4, s. 101—104.
80. **Divers R.F.** Refrigeration Lubrikants — Refrigerating Engineering 66, 1958, № 10. S. 40—45, 59.
81. **Оно Хироеси, Есида Хироми Мацун Сигэо**, “ Рэйто Refr”, 1970, 45, 516, 909.
82. **Spauschus H.O.** Copper Transfer in Refrigerant — Oil Solutions – ASHRAE Journal S. 1963, N 8, s. 90—94.

К главе 3. Методы оценки антифрикционных и прочностных свойств тонких металлических покрытий и испытаний смазочных материалов

1. **Гаркунов Д.Н.** Влияние отношения площадей трения на износ. ДАН СССР, т.104, № 2, 1955. С. 227—228.
2. **Гаркунов Д.Н.** Методы оценки антифрикционных и прочностных свойств тонких металлических покрытий, применяемых при ремонте трущихся деталей // Труды совещания. Методы испытания на изнашивание. Издательство АН СССР. М.: 1962. С. 57—62.
3. **Гаркунов Д.Н.** Повышение износостойкости деталей машин. Киев.: Машгиз. 1960. 162 с.
4. **Гаркунов Д.Н.** Повышение износостойкости деталей самолетов. Оборонгиз, 1960. 138 с.
5. **Гутченко В.М.** Выступление на совещании по вопросам трения и изнашивания. Сб. статей Развитие теории трения и изнашивания. Издательство АН СССР, 1957. С. 173—175.

6. **Евдокимов В.Д., Семов Ю.Н.** Экзоэлектронная эмиссия при трении М.: Наука, 1973. 180 с.
7. **Елин Л.В.** Некоторые характеристики трения металлов в условиях граничной смазки // Труды 1-й Всесоюзной конференции по трению и износу. Издательство АН СССР. 1939. Т. 1. С. 277—288.
8. **Зайцев А.К.** Основы учения о трении, износе и смазке машин. Ч. 3. Машгиз, 1947. 219 с.
9. **Испытания металлов.** Сборник статей под редакцией К. Нитцше. Издательство Металлургия. М.: 1967. 451 с.
10. **Конвисаров Д.В.** Износ металлов ГОНТИ. М.–Л, 1938. 304 с.
11. **Крагельский И.В.** Изнашивание и меры борьбы с ним // Сб. статей Повышение долговечности машин. Машгиз, 1956.
12. **Крагельский И.В.** Трение и износ. Изд. 2-е. Машиностроение. М.: 1966. 466 с.
13. **Кужаров А.С., Онищук Н.Ю.** Долговечность трущихся деталей машин. Машиностроение. Вып. 3. 1988. С. 96—143.
14. **Кузнецов В.Д.** Физика твердого тела. Т. 4. Томск: Полиграфиздат, 1947. 542 с.
15. **Поляков А.А.** К вопросу о лабораторных испытаниях материалов узлов трения // Трение и износ. Т. 11. № 6. 1990. С. 668—674.
16. **Поляков А.А.** Методика лабораторных исследований износа материалов поршневых колец и цилиндров на машине 77МТ-1. Методы испытаний на изнашивание // Сб. статей. Издательство АН СССР. 1962. С. 225—228.
17. **Прокопенко А.К.** Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения. Легпромиздат, 1987. 101 с.
18. **Поляков С.А., Рыбакова Л.М.** Трение и износ. 1985. Т. 6. № 5. С. 908—913.
19. **Розенберг Е.М.** Исследование износа чугуна при возвратно-поступательном движении // Труды 1-й Всесоюзной конференции по трению и износу. Т. 1. Издание АН СССР. 1939. С.146—162.
20. **Розенберг Ю.А., Виноградова И.Э.** Смазка механизмов машин. Гостоптехиздат, 1960. 339 с.
21. **Словарь-справочник** по трению, износу и смазке деталей машин. 2-е издание. Киев: Наукова думка, 1990. С. 111—122.
22. **Старосельский А. А., Гаркунов Д.Н.** Циклическая контактная прочность хромового покрытия // Вестник машиностроения, № 3, 1951; № 6, 1952. С. 55—57; № 7, 1959. С. 70—74.
23. **Хрущов М.М., Беркович Е.С.** Точное определение износа деталей машин. Изд-во АН СССР. М., 1953. 115 с.

К главе 4. Новый курс в преподавании триботехники — избирательный перенос в узлах трения*

I. Механизм избирательного переноса

1. **Бабель В.Г., Байрамуков М.Д.** Об использовании композиций, содержащих галогениды металлов переменной валентности и исследование механизма их смазочного действия // Сб. Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 2. М.: Машиностроение, 1987. С. 7—19.

* В главе 4 данная литература не значится. Список дан для более углубленного изучения курса «Избирательный перенос в узлах трения».

2. **Бородай А.В., Турченюк Т.Г., Статешная Е.С.** О многофункциональной модели фрикционного взаимодействия тел в режиме избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1998, № 2. С. 12—24.
3. **Васильев Ю.Н., Горбунов А.Д., Польцер Г.** и др. Единичный контакт при трении с граничной смазкой в режиме избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 3—4. С. 41—46.
4. **Гаркунов Д.Н., Поляков А.А.** О механизме избирательного переноса при трении меди и медных сплавов в среде глицерина // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. М.: Наука, 1968. С. 63—72.
5. **Гаркунов Д.Н., Польцер Г.** Анализ изнашивания и избирательный перенос при трении//Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 1. С. 9—11.
6. **Любимов Д.Н., Чигаренко Г.Г., Иванов А.Е.** Особенности избирательного переноса при сухом трении металлополимерных систем // Эффект безызносности и триботехнологии, 1992, № 1. С. 16—20.
7. **Куксенова Л.И., Рыбакова Л.М.** Структура поверхности твердых тел и ее роль в реализации избирательного переноса // Долговечность трущихся деталей машин. Машиностроение. Вып. 1, 1996. С. 13—39.
8. **Макаров С., Королев Н., Худых М.** Механизм избирательного переноса как кооперативное взаимодействие компонентов гетерогенной системы // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 3—4. С. 76—88.
9. **Марчак Р.** Физико-химические аспекты избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1993, № 1. С. 42—49.
10. **Пичугин В.Ф.** Влияние электронного строения металлов в смазочном материале на трение и изнашивание стальных пар // Эффект безызносности и триботехнологии. 1993, № 2. С. 3—10.
11. **Поляков А.А.** Безызносность при трении на основе когерентного взаимодействия дислокаций и вакансий // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 1. С. 12—17.
12. **Поляков А.А.** Трение на основе самоорганизации // Эффект безызносности и триботехнологии. 1996, № 3—4. С. 47—122.
13. **Поляков А.А.** Некоторые аспекты развития эффекта безызносности // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 1. С. 3—18.
14. **Поляков А.А.** Опыт исследования диссипативной структуры избирательного переноса в металлической пленке при трении // Эффект безызносности и триботехнологии. 1996, № 3—4. С. 30—46.
15. **Поляков А. А.** О свойствах смазочных систем материалов в закрытой и открытой термодинамических системах // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997, № 1. С. 40—45.
16. **Поляков А.А.** К вопросу о синергетике, деформации, износе и энтропии металлических материалов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997, № 2. С. 3—11.
17. **Ригни Д.А.** Физические аспекты трения и изнашивания // Трибология: Исследования и приложения (опыт США и стран СНГ) / Под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, К.Н. Мышкина. М.: Машиностроение, 1993. 454 с.
18. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** О рентгеноструктурном исследовании поверхностных слоев металла при трении в условиях избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 2. С. 46—56.
19. **Савенко В.И.** Роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике. Обзор // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 3—4. С. 26—38.

II. Конструкционные материалы, работающие в режиме избирательного переноса

1. **Акулич Н.В.** Композиционные полимерные материалы, работающие в режиме избирательного переноса // Материалы семинара МДНТП. М., 1972. С. 202—208.
2. **Голуб М.В.** Твердосплавные износостойкие материалы для торцевых уплотнений валов центробежных насосов // Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 113—118.
3. **Голуб М.В.** Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля. Технология получения, исследование и применение // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, №1. С. 24—39.
4. **Грискин Е.Н.** Новый способ получения износостойкой и антифрикционной поверхности и ее экономическая эффективность // Материалы семинара. МДНТП, 1972. С. 183—188.
5. **Грискин Е.Н.** Износостойкий материал для торцевых уплотнений электробуров // Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 107—113.
6. **Дякин С.И., Филимонова В.В., Титов В.В.** Исследование конструкционных и смазочных материалов на трение и изнашивание в тяжелонагруженных шарнирах // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 3, 1988. С. 144—157.
7. **Куксенова Л.И., Вячеславова Л.А., Рыбакова Л.И.** Структурные изменения в поверхностных слоях алюминиевой бронзы при трении в смазках на основе углеродного масла М9С // Эффект безызносности и триботехнологии. 1993, № 1. С. 3—9.
8. **Куранов В.Г.** Фрикционная непроводимость слаботочных контактов. Саратовский государственный технический университет, 1996. 57 с.
9. **Кольцов Л.А.** Манжетные уплотнения из композиционного полиуретана, работающие в режиме избирательного переноса // Долговечность трущихся деталей машин. Вып.1, 1996. С. 54—71.
10. **Мельников В.Г.** Избирательный перенос при трении металлостеклянных материалов в растворах щелочей и управление этим процессом // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 2. С. 20—26.
11. **Мельников В. Г.** Опыт разработки и применения антифрикционных порошковых материалов с активными и нейтральными наполнителями // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 3—4. С. 19—25.
12. **Петросянц А.А.** Проявление избирательного переноса в парах трения стекло—стекло // Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 120—127.
13. **Рабннович Л.В., Казакова Н.Н., Бергман Т.П.** Использование явления переноса золота в узлах трения приборов // Материалы семинара. МДНТП, 1972. С. 229—236.

III. Смазочные материалы, обеспечивающие режим избирательного переноса

1. **Авдуевский С.В., Броновец М.А., Буше Н.А., Школьников В.М.** Теоретические и прикладные аспекты современной трибологии // Первая международная конференция «Энергодиагностика». Сборник трудов. Москва, 1995. Т. 1. Пленарные доклады. М.: 1995. С. 31—61.
2. **Гаврилюк М.Р., Чукмарев А.С., Васильков О.А.** Повышение эффективности смазочных материалов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 1. С. 40—42.
3. **Гаевик Д.Т.** Пути улучшения использования и уменьшения расхода смазочных материалов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1993, № 1. С. 47—51.
4. **Гарновский А.Д., Бушкова Е.** Влияние металлокомплексных и комплексообразующих добавок на свойства смазочных материалов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 1. С. 49—54.
5. **Денисова Н.Е., Гаркунов Д.Н., Гонтарь Г.О.** и др. Теоретическое обоснование количественного выбора наполнителя – антифрикционного металла в металлоплакирующей смазке // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 4. 1990. С. 160—169.
6. **Дякин С.И.** Опыт повышения надежности и ресурса узлов трения с использованием металлоплакирующих смазочных материалов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 3—4. С. 3—9.
7. **Кожаева Н.,Носенко Н., Иванкина О.** и др. Многофункциональный пакет металлоплакирующих присадок «Трибокор»// Эффект безызносности и триботехнологии. 1997, № 1. С. 46—48.
8. **Кужаров А.С.** Физико-химические основы смазочного действия в режиме избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 2. С. —14.
9. **Некрасов С. , Стрельцов В.** Применение масел с металлоплакирующими присадками в карбюраторных двигателях // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997, № 2. С. 66—71.
10. **Потапов Г., Балабанов В., Быстров В.** Обоснование концентрации металлоорганических присадок к моторным маслам // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997, № 2. С. 55—59.
11. **Прокопенко А.К.,Францев В.Н., Хомяк О.Н., Кот А.Н.** Повышение долговечности механизма вязания замочных трикотажных машин применением металлоплакирующего смазочного материала // Долговечность трущихся деталей машин. Вып.4. 1990. С.186—189.
12. **Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г., Бурлов А.С.** Участие координационных соединений переходных металлов в формировании смазочного слоя // Доклады XI Всесоюзного симпозиума по механохимии и механоэмиссии твердых тел. АН СССР, Чернигов, 1990. С. 119.
13. **Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г., Бурлов А.С.** и др. Исследование трибохимических реакций, приводящих к формированию смазочного слоя при избирательном переносе // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 3—4. С. 64—75.
14. **Цыпцин В., Стрельцов В.** Исследование свойств сверхтонких порошков металлов, добавляемых в смазочные масла для реализации эффекта избира-

тельного переноса при трении // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 3—4. С. 39—47.

IV. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) поверхностей стальных и чугунных деталей

1. **Балабанов В.И.** Финишная антифрикционная безабразивная отработка деталей дизелей // Тракторы и сельхозмашины. 1996, № 12. С. 23—25
2. Специальная антифрикционная механическая обработка поверхностей катания колесной пары // Железные дороги. 1997, № 6. С. 3—5.
3. **Быстров В.Н., Прокопенко А.К.** Финишная антифрикционная безабразивная обработка в металлоплакирующих средах // Трение, износ и смазочные материалы. Труды Всесоюзной конференции. Ташкент, 1985. Т. 5. С. 8—9.
4. **Виниченко И.В., Гриденок С.С., Ляшенко А.В.** Исследование влияния фрикционного латунирования на приработку цилиндропоршневой группы судовых дизелей // Тезисы докладов на научно-техническом семинаре. М.,1976. Госстандарт СССР. Т.1. С. 116—122.
5. **Гаркунов Д.Н.,Лозовский В.Н.** Влияние фрикционного бронзирования и латунирования на качество поверхности // Труды семинара по качеству поверхности. 1961, № 5. С. 386—391.
6. **Греков Г.М. , Гриденок С.С., Евдокимов В.Д.** Уменьшение заедания в резьбовых соединениях путем нанесения латуни фрикционным методом // Вопросы судостроения. Вып. 13. 1981. С. 59—62.
7. **Гриденок С.С., Снитковский М.М., Гаркунов Д.Н.** Применение фрикционного латунирования для повышения сопротивления фреттинг-усталости прессовых соединений // Избирательный перенос при трении и его экономическая эффективность. МДНТП, 1972. С. 91—93.
8. **Гриденок С.С., Снитковский М.М.** Фрикционное латунирование теплостойких и нержавеющих сталей // Избирательный перенос в узлах трения. М., 1971. С. 33—35.
9. **Куксенова Л.И., Назаров Ю.А., Рыбакова Л.М.** Оценка трибологической эффективности покрытий после финишной антифрикционной безабразивной обработки // Тезисы докладов на международном конгрессе "Защита – 95". Академия нефти и газа им. Губкина, 1995. С. 158.
10. **Намагонов В.В., Кисель В.В., Лялякин В.П.** Повышение долговечности гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания способом ФАБО // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 4. 1990. С. 139—144.
11. **Польцер Г., Мюллер, Ланге И.** и др. Использование трения для нанесения покрытий на рабочие поверхности цилиндров двигателей // Долговечность трущихся деталей машин. Вып.1, 1996. С. 88—96.
12. **Польцер Г., Фирковский А., Ланге И.** Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 5. 1990. С. 86—122.
13. **Прокопенко А.К.** Технологические методы повышения срока службы узлов трения машин на основе эффекта безызносности // Тезисы доклада на Международном конгрессе «Защита – 95». Академия нефти и газа им. И.М. Губкина, 1995. С. 172.

14. **Потапов Г., Балабанов В.** Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) гильз цилиндров и шеек коленчатых валов двигателей // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 3—4. С. 48—53.
15. **Румянцев Г.И.** Фрикционное латунирование деталей топливной аппаратуры // Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 155—159.
16. **Рыбакова Л.М.** Реализация избирательного переноса в парах трения обработанных способом ФАБО // Тезисы доклада на Международном конгрессе «Защита – 95». Академия нефти и газа им. И.М. Губкина, 1995. С. 177.
17. **Руководство** по применению ФАБО деталей и технологического состава металлоплакирующей присадки «Велап» при капитальном ремонте, обкатке и эксплуатации ДВС. РТМ. Россия 01.0018-92. Министерство сельского хозяйства РФ.
18. **Терешкин С.А., Чекулаев В.И.** Фрикционное латунирование деталей двигателей // Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 152—155.
19. **Турчков Е.В.** Финишная антифрикционная безабразивная обработка поверхностей трения // Фрикционное взаимодействие твердых тел с учетом среды. Иваново. Ивановский политехнический институт, 1982. С.135—138.

V. Применение избирательного переноса в узлах трения машин

1. **Асташкевич Б.М., Булюк А.** Исследование изнашивания цилиндровых втулок из чугунов, легированных медью // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997, № 1. С. 27—32.
2. **Асташкевич Б.М.** Повышение сопротивления задиру и изнашиванию деталей цилиндропоршневой группы тепловозных дизелей методами избирательного переноса // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 1. 1996. С. 40—53.
3. **Бурумкулов Ф.Х., Андреева А.Г., Кулаков А.Т.** Сравнительная оценка износостойкости двигателя КамАЗ-740 // Эффект безызносности и триботехнологии. 1993, № 1. С. 51—56.
4. **Быстров В.Н.** Избирательный перенос при трении – новые перспективы в изготовлении и эксплуатации машин // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 2. С. 15—20.
5. **Гаркунов Д.Н., Бондюгин В., Быченков В.** Вопросы и ответы по триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 1. С. 55—69.
6. **Гаркунов Д.Н., Снитковский М.М., Соломко В.А.** О применении избирательного переноса в узлах трения судовых механизмов и устройств // ЦБНТИ Минморфлота СССР. 1975. 31 с.
7. **Голуб М.** Опыт конструирования, производства и эксплуатации износостойких уплотнений валов насосов магистральных нефтепроводов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 3—4. С. 54—63.
8. **Козлов Л.К.** Опыт применения избирательного переноса в узлах трения судовых машин и механизмов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 3—4. С. 22—27.

9. **Кремешный В.М. , Беляков А.** Технологическое обеспечение эксплуатационной надежности и ресурса узлов трения авиационной техники // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 3—4. С. 10—18.
10. **Кремешный В.М.** Новые способы повышения износостойкости тяжелонагруженных узлов трения машин. Обзорная информация. Рига, Госплан Латвийской ССР. 1987. 48 с.
11. **Кремешный В.М., Тепляшин А.** Повышение износостойкости стальных сферических шарниров // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 1. С. 18—37.
12. **Машков Ю., Баранов Г., Иссерт И.** Исследование и перспективы применения избирательного переноса при трении в изделиях микрокриогенной техники // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997, № 2. С. 60—65.
13. **Мелкумян С.А.** Повышение долговечности плунжерных пар насосов на основе эффекта безызносности // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 3—4. С.47—51.
14. **Суранов Г.** Повышение долговечности деталей цилиндропоршневой группы двигателей применением избирательного переноса при трении // Эффект безызносности и триботехнолгии. 1997. № 1. С. 20—26.

VI. Отдельные издания по избирательному переносу при трении

1. **Безызносность.** Межвузовский сборник. Ростов-на Дону. Ростовский институт сельскохозяйственного машиностроения / Под ред. д.т.н. проф. А.С. Кужарова. Вып.1, 1990. 175 с.; Вып. 2, 1992. 197 с.
2. **Гаркунов Д.Н., Дякин С.И., Курлов О.Н.** и др. Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения. М.: Машиностроение, 1982. 204 с.
3. **Избирательный** перенос в узлах трения. Материалы семинара. МДНТП. М., 1971. 99 с.
4. **Избирательный** перенос при трении // Сб. статей под ред. д.т.н., проф. Д.Н. Гаркунова и д.х.н. Ю.К Симакова. Наука, 1975. 87 с.
5. **Избирательный** перенос при трении. Водородное изнашивание / Библиографический указатель опубликованной литературы за 1956—1985 гг. Изд. 3-е дополненное. Библиотека по естественным наукам. Отдел БЕН Института Машиноведения им. Благонравова АН СССР. 1986. 293 с.
6. **Избирательный** перенос при трении и его экономическая эффективность. Труды семинара. МДНТП. М., 1972. 249 с.
7. **Новые** пластичные смазочные материалы для тяжелонагруженных узлов. Рига, Госплан Латвийской ССР. 1986. 57 с.
8. **Надежность** и контроль качества. № 4. Приложение к журналу «Стандарты и качество», 1988. 63 с.
9. **Повышение** срока службы машин и оборудования бытового обслуживания на основе триботехники // Сборник научных трудов. Московский технологический институт Минбыта РСФСР / Под ред. к.т.н. Прокопенко А. К.. М., 1989. 115 с.
10. **Применение** избирательного переноса в узлах трения машин. Тезисы докладов на научно-техническом семинаре. М., 1976. Гостандарт СССР. Т. I, 183 с.; Т. II. 137 с.

11. **Прокопенко А.К.** Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения. М.: Легпромбытиздат, 1987. 101 с.
12. **Электрохимические** процессы при трении и использование их в борьбе с износом // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Одесса. ВСНТО. Раздел "Избирательный перенос в трудящихся деталях. 1973. С. 129—189.
13. **Methoden und Verfohren** zur Verschleiβminderung. Selektive Ubertragung. (Vortrage des internationded Problem — seminars, 1989 in Zwickau). Teill, 100s; Teil II, 200s.
14. PROBLEMY "BEZZUZYCIOWE CO TARCIA" W MASZYNACH MATERIALY KONFERENCY) NE, RADOM 12—13 maj, 1993 WYDAWNICTWO WSI RADOM, 204 s.
15. Frhühung der Verschleiβiestigkeit anf der selektiven bertragung. Erarbeitet von einem Autorenkolektiv VEB VERLAG TECHIK BERLIN, 1981, 191 s.

К заключению

1. **Бабель В.Г.** Повышение термоокислительной стабильности масел металлоплакирующими присадками // Международный конгресс "Защита 95". Москва, ноябрь 1995. Академия нефти и газа им. И.М. Губкина.
2. **Балабанов В.И.** Восстановление работоспособности ДВС в процессе их эксплуатации // Автомобильная промышленность. 1996, № 3. С.16—18.
3. **Воронков Б.Д., Шадрин В.Г., Петрова И.В.** Состояние и перспективы использования эффекта избирательного переноса при трении в химическом оборудовании. ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. М., 1985. 35 с.
4. **Гаркунов Д. Н., Крагельский И.В.** Об атомарном схватывании материалов при трении. "Доклады АН СССР", 1957, т. 113, № 2. С. 326—327.
5. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника (пособие для конструктора). Машиностроение, 1999. С. 329.
6. **Денисова Н.Е., Литвинов А.Н.** Выбор смазочных материалов для типовых узлов и механизмов изделий машиностроения. Пензенский государственный университет. Пенза, 1998. 118 с.
7. **Дякин С. И.** Опыт повышения надежности и ресурса узлов трения с использованием металлоплакирующих смазочных материалов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994, № 3—4. С. 3—9.
8. **Избирательный перенос** при трении. Водородное изнашивание // Библиографический указатель опубликованной литературы за 1956—1985 гг. Издание 3-е дополненное. Академия наук СССР. Библиотека по естественным наукам. М., 1986. С. 293.
9. **Кужаров А.С.** Физико-химические основы смазочного действия в режиме избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992, № 2. С. 3—14.
10. **Открытия** в СССР 1957—1967 // Сборник кратких описаний открытий, внесенных в Государственный реестр СССР. ЦНИИПИ. М, 1968. С.52—53.
11. **Польцер Г., Фирковский А, Ланге И.** Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос // Сб. Долговечность трущихся деталей машин. Машиностроение. Вып. 5. 1990. С. 86—22.

12. **Поляков А.А.** Трение на основе самоорганизации // Эффект безызносности и триботехнологии. 1996, № 3—4. С. 47—122.
13. **Рубин М.Б., Зиновьев В.М.** Свойства сервовитного слоя при избирательном переносе в воде // Избирательный перенос при трении и его экономическая эффективность. МДНТП. М., 1972. С. 53—59.
14. **Старосельский А.А., Гаркунов Д.Н.** Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1967. 394 с.
15. **Шепер М. Н.** Испытания металлоплакирующих смазочных материалов, их разработка и внедрение // В кн.: Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения. Машиностроение, 1982. С. 162—173.
16. **Ebeling W, A. Engel, R. Feistel** " Physik der Evolutions-prozesse" Akademie-Verlag Berlin. 1990. S. 332.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Г

Д

Е

Л

М

Н

T

U

V

W

Y

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

К

О

П

Р

С

Т

Я

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть I. ИЗНОС

Часть II. БЕЗЫЗНОСНОСТЬ
(избирательный перенос при трении)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

TABLE OF CONTENTS

PART 1. WEAR

PART 2
NO-WEAR
(Selective transfer during friction)

Garkunov D.N.

Triboengineering (wear and no-wear): a textbook for technical colleges. — 4th impression, revised and complemented. — M.: Moscow Agricultural Academy, 2000. — 610 p.,

Annotation

The book consists of *Introduction to triboengineering* and two parts, the first part dealing with wear and the second with no-wear.

Introduction states practical examples of solving triboengineering tasks, stages of triboengineering development in Russia, and its engineering and technical problems.

The first part examines physicochemical properties of surfaces, intercontacting parts, types of friction in machinery units, and the part wear mechanism. Types of wear and various surface damages, including those due to cyclic contact loads, are analyzed in detail. Hydr ogen wear is scrutinized as a new type of contact interrelation of solids. Methods of improving part durability are stated, depending on the type of wear or surface damage.

The second part describes the essence of the no-wear effect, its mechanism, and regularities. The history of this phenomenon is revealed. The physicochemical processes of the no-wear are investigated. The no-wear effect is shown to belong to self-organizing phenomena of the abiocoen.

The second part largely deals with uses of the no-wear effect in different fields of engineering — aviation, navy, chemical engineering, heavy engineering, light industry, etc. Methods of testing lubricants and evaluating antifriction and strength properties of thin metal coatings are given. A new course in teaching triboengineering is presented with regard to the three issues, which will allow implementing the no-wear effect in machinery friction units, namely: finishing antifriction non-abrasive treatment of rubbing surfaces of steel and cast-iron parts, metal-plating lubricants, and the recovery of worn-out combustion engines without dismantling.

For students in specialty 120600 "Equipment and Technology for Recovering Machinery and Instruments and Improving Their Durability". The book may be useful for engineers and technicians at machine-building and repairs enterprises.

Prof. Dr. D. N. Garkunow

Tribotechnik — Yerschleiβ und Yerschleiβlosigkeit
Ein Lehrbuch fur Studenten an Hochschulen, 4. Ausgabe, überarbeitet und erwei-tert - Moskau: Verlag Maschintnbau, 2001 - 616 Seiten

Das Buch besteht aus einer Einfuhrung in die Tribotechnik sowie aus zwei Hauptabschnitten: der erste Hauptabschnitt ist dem Yerschleiβ gewidmet und der zwei-te — der Yerschleiβlosigkeit.

In der Einfürhrung werden praktische Beispie zur Lösung tribotechnischer Aufgaben, die Etappen in ger Entwicklung der Tribotechnik in Ruβland sowie ingenieurtechnische Probleme der Tribotechnik dargelegt, die Kontaktwechselwirkung bei Bauteilen, die Reibungsarten in den Kontaktbereichen bei Maschinen und Mechanismen von verschleiβenden Elementen.

Ausführlich erfolgt eine Voranalyse zu den Abnutzungsarten und Beschädigungen von zyklischen Kontaktbelastungen.

Eine besondere Aufmerksamkeit wird dem Wasserstoffverschleiβmechnismus geschenkt — einer neuen Art der Kontaktwechselwirkung fester Körper. In Abhängigkeit von der Art der Abnutzung oder der Oberflächenbeschädigung bei der Reibung gibt es Verfahren zur Vergröβerung der Nutzungsdauer.

Im zweiten Hauptabschnitt werden das Wesen des Effektes der Verschleiβ losigkeit sowie sein Mechanismus und seine Gesetzmäβ igkeiten behandelt. Es wird dargelegt, wie sich diese Erscheinung ausbildet. Ebenso werden die Ergebnisse aus den Untersuchungen zu den physikalisch-chemischen Prozessen dargestellt, die fur den Effekt der Verschleiβlosigkeit charakteristisch sind. Es wird gezeigt, daβ der Effekt der Verschleiβlosigkeit mit Prozessen der Selbstorganisation in der unbelebten Natur zusammenhängt.

Im zweiten Hauptabschnitt nimmt die Anwendung des Effektes der Verschleiβlosigkeit in verschidenen Bereichen der Technik einen groβen Platz ein, so z. B. in der Flugtechnik, im Schiffbau, im chemischen Maschinenbau, im Schwermaschinenbau, in der Leichtindustrie sowie in anderen Bereichen.

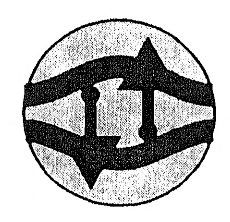
Es werden Verfahren zur Ermittlung der Antifriktions- und der Festigkeiseigenschαften von dünnen metallischen Beschichtungen sowie zur Untersuchung von Schmierstoffen hinsichtlich dieses Effektes vorgestellt. Es wird auch eine neue Vorgehensweise zur Ausbildung auf dem Gebit der Tribotechnik vorgeschlagen und begründet, wobei 3 Fragenkomplexe in den Mittelpunkt gestellt werden, die es gestatten, den Effekt der Verschleiβlosigkeit in Reibstellen von Maschinen zu realisieren: Reibbeschichten von Stahl- und Guβreibflächen, metallplattierende Schmitrstoffe und Selbstbeschichtung von abgenutzten Bauteile bei Verbrennungsmotoren.

Abschlieβend erfolgen eine Patent beschreibung zum Effekt der Verschleiβ losigkeit sowie eine Würdigung von bekannten Wissenschaftlern, die auf diesem Gebiet erfolgreich gearbeitet haben und schlieβlich eine Einschätzung zur Perspektive.

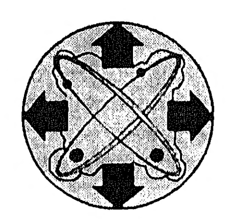
In der 3. Ausgabe erfolgt insbesondere eine Uberarbeitung unter dem Aspekt der Hochschulausbildung auf dem Gebiet des Maschinenbaus. Die Ausbildung von Studenten erfolgt auf der Grundlage dieser Erkenntnisse in der Spezialisierungs-richtung 120600 "Geräte und Technologie zur Vergröβerung der Verschleiβbestandigkeit sowie Regenerierung von Elementen des Maschinen- und Apparatebaus".

Das vorliegende Buch kann aber auch fur ingenieurtechnische Arbeiten im Maschinenbau und in Reparaturbetrieben genutzt werden.

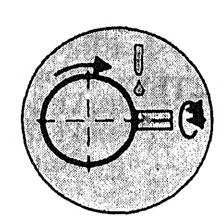
Рисунки на обложке книги



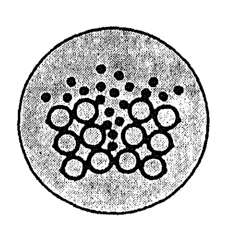
Эмблема эффекта безызносности. Стрелки, направленные друг к другу, обозначают взаимный перенос материала с одной поверхности на другую. Красные полосы — это сервовитная пленка на обеих поверхностях трения.



Эмблема водородного изнашивания металлов. Стрелки, направленные в разные стороны, указывают на разрушение поверхности детали под действием атомарного водорода, проникшего в поверхностный слой.



Эмблема триботехнологией. К вращающейся детали прижимается пруток из медного сплава. В зону контакта подается технологическая жидкость, которая обеспечивает намазывание медного сплава на стальную поверхность без ее повреждения.



Эмблема эффекта Ребиндера. На поврежденный участок атомной решетки металла действует поверхностно-активное вещество (красные точки), облегчая пластифицирование поверхностного слоя или способствуя, в зависимости от обстоятельств, хрупкому разрушению.

Стихотворение на стр. 3 поэта **В. Цибина**

Художник **Нестеров Н.Б.**

Учебное издание

Гаркунов Дмитрий Николаевич

ТРИБОТЕХНИКА (ИЗНОС И БЕЗЫЗНОСНОСТЬ)

ИД № 03023 от 13.10.2000 г.
Подписано в печать 25.01.01. Формат $70\times108^1/_{16}$ Усл. печ. л. 53,9
Уч.-изд. л. 37,2 Усл. кр.-отт. 54,25 Бумага офсетная Гарнитура «Таймс»
Печать офсетная Тираж 2000 Изд. № 06 Заказ № 1108

АНО «Издательство МСХА»
127550, Москва, ул. Тимирязевская, 44

Отпечатано с готового оригинал-макета в ГУП ордена «Знак Почета»
Смоленской областной типографии им. В. И. Смирнова.
214000, г. Смоленск, пр-т им. Ю. Гагарина, 2.

ISBN 5-94327-004-3

